

**ANALISIS DOSIS *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*
(BNCT) PADA KANKER OTAK (*GLIOBLASTOMA MULTIFORM*)
MENGUNAKAN MCNPX-CODE DENGAN SUMBER
NEUTRON DARI KOLIMATOR KOLOM TERMAL REAKTOR
KARTINI**

SKRIPSI

**Diajukan Kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains**



Oleh

**KHOLIDAH HASYIM NUR MAHMUD
10306141017**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
2017**

PERSETUJUAN

SKRIPSI

**ANALISIS DOSIS *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT) PADA
KANKER OTAK (*GLIOBLASTOMA MULTIFORM*) MENGGUNAKAN
MCNPX-CODE DENGAN SUMBER NEUTRON DARI KOLIMATOR
KOLOM TERMAL REAKTOR NUKLIR KARTINI**

Skripsi ini
Telah Memenuhi Persyaratan dan Siap Untuk Diuji
Disetujui dan Disahkan pada

Tanggal 10 Juli 2017

Untuk dipertahankan di depan Panitia Penguji Skripsi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta

Menyetujui

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Prof. Ir. Y. Sardjono, A.P.U.

NIP. 19590610 198103 1 002

Dr. Yosaphat Sumardi, M. Si

NIP. 19510516 197603 1 001

SURAT PERNYATAAN

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Kholidah Hasyim Nur Mahmud
NIM : 10306141017
Program Studi : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : Analisis Dosis *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) Pada Kanker Otak (*Glioblastoma Multiform*) Menggunakan MCNPX-Code Dengan Sumber Neutron Dari Kolimator Kolom Termal Reaktor Nuklir Kartini

Menyatakan bahwa skripsi dengan judul tersebut di atas saya susun dengan sejujurnya berdasarkan norma akademik. Adapun semua kutipan di dalam skripsi ini telah saya sertakan nama pembuatnya/penulisnya dan telah saya cantumkan ke dalam Daftar Pustaka .

Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan apabila di kemudian hari saya terbukti melanggar pernyataan saya tersebut di atas, saya bersedia menerima sanksi sesuai aturan yang berlaku.

Yogyakarta, 7 Juli 2017

Yang menyatakan



Kholidah HNM

NIM : 10306141017

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “Analisis Dosis *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) Pada Kanker Otak (*Glioblastoma Multiform*) Menggunakan MCNPX-Code Dengan Sumber Neutron Dari Kolimator Kolom Termal Reaktor Nuklir Kartini” yang disusun oleh Kholidah Hasyim Nur Mahmud, NIM (10306141017) ini telah dipertahankan di depan Dewan Penguji pada tanggal 12 Juli 2017 dan dinyatakan LULUS.



Susunan Dewan Penguji

Nama

Jabatan

Tanda Tangan Tanggal

1. Prof. Ir. Y. Sardjono, A. P. U Ketua Penguji
22/07/2017
2. Dr. Yosaphat Sumardi, M. Si Sekretaris Penguji
24/07/2017
3. Sumarna, M. Si, M. Eng Penguji Utama
24/07/2017

Yogyakarta, 25 Juli 2017

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan,



Dr. Martono

19620329 198702 1 002

HALAMAN PENGESAHAN PERSETUJUAN PSTA-BATAN

SKRIPSI

**ANALISIS DOSIS *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT) PADA
KANKER OTAK (*GLIOBLASTOMA MULTIFORM*) MENGGUNAKAN
MCNPX-CODE DENGAN SUMBER NEUTRON DARI KOLIMATOR
KOLOM TERMAL REAKTOR NUKLIR KARTINI**

Oleh :

Kholidah Hasyim Nur Mahmud


NIM. 10306141017

Telah Disetujui dan Disahkan


Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA-BATAN YOGYAKARTA)

Kepala Bidang Fisika Partikel

Pembimbing di PSTA-BATAN


Ir. Purady Lismu Wahyono, DEA

NIP. 196100251988101001

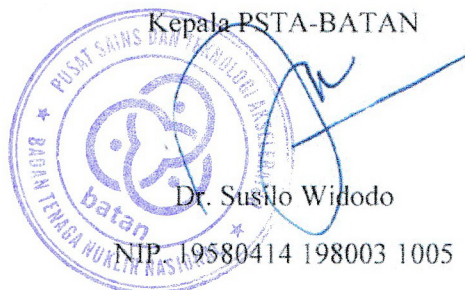

Prof. Ir. Yohannes Sardjono, A.P.U

NIP. 19590610 198103 1 002

Yogyakarta, 24 Juli 2017

Mengetahui

Kepala PSTA-BATAN



Dr. Susilo Widodo

NIP. 19580414 198003 1005

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S. Al-Insyirah:5-6)

Skripsi ini kupersembahkan untuk Bapak dan Ibu tercinta yang selalu mendoakan dan memberi motivasi untuk tetap semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Tidak lupa pula kesabaran dan dukungan untuk menunggu keberhasilan dan kesuksesanku.

Terimakasih dukungannya untuk adik-adikku tersayang, Kholil Hasyim Nur Mahmud dan Abdurrahman Al Khusaini. Terimakasih untuk Pakdhe, Budhe dan semua anggota keluarga yang selalu mendoakan keberhasilanku.

Untuk Mas Ilma, Mbak Dwi, Buyung, Norma, Sinta, Dika, Siti terimakasih atas bantuan yang kalian berikan. Semoga berkah dan kesuksesan selalu mengiringi kalian, sukses untuk kita semua.

**ANALISIS DOSIS *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT) PADA
KANKER OTAK (*GLIOBLASTOMA MULTIFORM*) MENGGUNAKAN
MCNPX-CODE DENGAN SUMBER NEUTRON DARI KOLIMATOR
KOLOM TERMAL REAKTOR NUKLIR KARTINI**

oleh

Kholidah Hasyim Nur Mahmud
10306141017

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi boron-10 yang optimal untuk terapi kanker pada rentang konsentrasi 20 $\mu\text{g}/\text{gram}$ sampai 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$ dengan metode *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) dan untuk mengetahui waktu iradiasi yang paling singkat untuk terapi kanker otak.

Glioblastoma multiform merupakan salah satu jenis tumor otak tingkat tertinggi dengan prognosis yang buruk sehingga perkembangan dari kanker itu sangat cepat. Penelitian ini adalah eksperimen berbasis simulasi dengan menggunakan program MCNPX. Pada kasus ini, sumber neutron termal dihasilkan oleh model Kolimator Kolom Termal Reaktor Nuklir Riset Kartini, Yogyakarta. Pemodelan dilakukan pada otak yang telah mengandung jaringan kanker sebagai target dan reaktor sebagai sumber iradiasi. Variasi konsentrasi boron yang dilakukan pada penelitian ini adalah 20, 25, 30 dan 35 $\mu\text{g}/\text{g}$ tumor. Keluaran MCNPX berupa nilai dosis hamburan neutron, dosis gamma dan fluks neutron dari reaktor. Nilai fluks neutron digunakan untuk menghitung dosis dari alfa, proton, dan gamma yang dihasilkan interaksi neutron termal dan material penyusun jaringan.

Berdasarkan hasil perhitungan konsentrasi boron di dalam kanker yang paling optimal adalah 30 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker dan dosis radiasi yang diterima kulit kurang dari 3 Gy. Waktu iradiasi yang dibutuhkan adalah 2,79 jam untuk konsentrasi 20 $\mu\text{g}/\text{gram}$; 2,78 jam untuk konsentrasi 25 $\mu\text{g}/\text{gram}$; 2,77 jam untuk konsentrasi 30 $\mu\text{g}/\text{gram}$, dan 2,8 jam untuk konsentrasi 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$.

Kata kunci : BNCT, Kanker otak, konsentrasi boron, waktu iradiasi.

**THE DOSE ANALYSIS OF BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY
(BNCT) TO THE BRAIN CANCER (*GLIOBLASTOMA MULTIFORM*) USING
MCNPX-CODE WITH NEUTRON SOURCE FROM COLLIMATED
THERMAL COLUMN KARTINI RESEARCH NUCLEAR**

by

Kholidah Hasyim Nur Mahmud
10306141017

ABSTRACT

This study aims to know the optimum concentration of Boron-10 in concentrations range 20 $\mu\text{g}/\text{gram}$ until 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$ with *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) methods and the shorter time irradiation for cancer therapy.

Glioblastoma multiform is the highest stadium of brain tumour with poor prognosis so that the progression of this tumour is very fast. This study was a simulation-based experiment using MCNPX. In this case, thermal neutron source was produced by the model of Collimated Thermal Column Kartini Research Nuclear Reactor, Yogyakarta. The modelling was performed at the brain that contains cancer tissue as a target and the reactor as a source radiation. The variation of Boron concentration in this research was 20, 25, 30 and 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$ tumour. The outputs of MCNP were neutron scattering dose, gamma ray dose and neutron flux from reactor. Neutron flux was used to calculate the dose of alpha, proton and gamma ray produced by the interaction of tissue material and thermal neutron.

Based on the calculations, the optimum concentration of Boron-10 in tumour tissue was 30 $\mu\text{g}/\text{gram}$ tumour and concentration of boron, the radiation dose in skin was less than 3 Gy. The irradiation times required were 2,79 hour for concentration 20 $\mu\text{g}/\text{gram}$; 2,78 hour for concentration 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$; 2,77 hour for concentration 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$; 2,8 hour for concentration 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$.

Keyword: BNCT, Brain cancer, boron concentration, irradiation time.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Analisis Dosis Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Pada Kanker Otak (Glioblastoma Multiform) Menggunakan MCNPX-Code dengan Sumber Neutron dari Kolimator Kolom Termal Reaktor Nuklir Kartini”**. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna memperoleh gelar sarjana pada program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta.

Dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir, penulis banyak mendapatkan dukungan dan bantuan dari beberapa pihak. Untuk itu dengan segala kerendahan dan ketulusan hati, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kepala PSTA BATAN Dr. Susilo Widodo yang telah memberikan izin melaksanakan penelitian di PSTA-BATAN dan membantu mengesahkan penyusunan skripsi.
2. Bapak Prof. Dr. Sutrisna Wibawa, M. Pd selaku Rektor Universitas Negeri Yogyakarta yang telah memberikan izin untuk penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Hartono, selaku Dekan FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, yang telah membantu pengesahan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Y. Sardjono, A.P.U selaku Dosen Pembimbing I dengan kesabaran, memberikan arahan, dan motivasi sampai penelitian dan penulisan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
5. Bapak Dr. Yosaphat Sumardi, M. Si selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan bimbingan serta saran dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Seluruh jajaran Dosen Jurusan Fisika Universitas Negeri Yogyakarta atas bantuan yang diberikan untuk kelancaran tugas akhir ini.

7. Kedua Orang tuaku dan adik-adikku yang tidak henti-hentinya mendoakan, memberikan dukungan dan fasilitas sehingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini secara lancer.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan namanya satu persatu atas semua bantuan dan dukungan yang diberikan.

Penulis menyadari bahwa hasil penelitian ini masih jauh dari sempurna sehingga penulis megharapkan saran dan kritik yang membangun. Semoga laporan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan khususnya bidang fisika serta penilitian selanjutnya.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Yogyakarta, 6 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	vi
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	3
C. Pembatasan Masalah.....	4
D. Rumusan Masalah.....	4
E. Tujuan Penelitian.....	4
F. Manfaat Penelitian.....	4

BAB II. STUDI PUSTAKA.....	6
A. Boron Neutron Captute Therapy (BNCT).....	6
B. Senyawa Boron.....	7
C. Dosis Kanker.....	19
D. Kanker Otak.....	22
E. Penelitian yang Relevan.....	25
F. Kerangka Berfikir.....	26
 BAB III. METODE PENELITIAN.....	 27
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	27
B. Variabel Penelitian.....	27
C. Alat Penelitian.....	27
D. Alur Penelitian.....	34
E. Alogaritma MCNPX.....	35
F. Running MCNPX.....	37
G. Metode Perhitungan Dosis Radiasi.....	39
 BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	 44
BAB V. PENUTUP.....	58
A. KESIMPULAN.....	58
B. SARAN.....	58
 DAFTAR PUSTAKA.....	 59
 LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	 62
A. Lampiran 1.....	62
B. Lampiran 2.....	70
C. Lampiran 3.....	73

D. Lampiran 4.....	76
E. Lampiran5.....	78
F. Lampiran 6.....	79
G. Lampiran 7.....	80
H. Lampiran 8.....	81
I. Lampiran 9.....	82
J. Lampiran 10.....	83
K. Lampiran 11.....	84

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Keluaran Kolimator Kolom Termal.....	11
Tabel 2. Rekomendasi IAEA untuk neutron keluaran kolimator.....	12
Tabel 3. Material untuk jaringan kulit.....	30
Tabel 4. Material untuk <i>cranium</i>	30
Tabel 5. Material untuk <i>soft tissue</i>	30
Tabel 6. Material untuk <i>cerebrum</i>	30
Tabel 7. Material untuk <i>Planning Tumor Volume</i> (PTV)	31
Tabel 8. Material untuk <i>Clinical Tumor Volume</i> (CTV).....	31
Tabel 9. Material untuk <i>Gross Tumor Volume</i> (GTV).....	31
Tabel 10. Format <i>Tally</i> pada MCNP.....	31
Tabel 11. <i>Tally</i> pada MCNP.....	32
Tabel 12. Parameter Input.....	36
Tabel 13. Batas Geometri.....	37
Tabel 14. Faktor kualitas radiasi.....	43
Tabel 15. Kriteria Neutron Kolimator Keluaran Kolom Termal.....	45
Tabel 16. Standar IAEA.....	45
Tabel 17. Hasil keluaran kolimator kolom termal.....	49
Tabel 18. Dosis dan waktu iradiasi pada jaringan kanker.....	56

Tabel 19. Efek deterministik pada kulit.....	56
Tabel 20. Perkiraan efek deterministik pada kulit.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Reaksi Boron-10 dan neutron termal.....	7
Gambar 2. Kurva distribusi fluks neutron termal dan neutron epitermal.....	10
Gambar 3. Skema Teras Reaktor.....	15
Gambar 4. Struktur jaringan otak.....	23
Gambar 5. Lapisan otak.....	24
Gambar 6. Alur Penelitian.....	34
Gambar 7. Alogaritma MCNPX.....	35
Gambar 8. Tampilan <i>Windows Command Prompt</i>	38
Gambar 9. Tampilan <i>Output/ Hasil Running</i>	39
Gambar 10. Model Kolimator Kolom Termal Reaktor Kartini.....	44
Gambar 11. Bentuk geometri otak.....	46
Gambar 12. Rentang kedalaman.....	47
Gambar 13. Penambahan <i>cell 134</i>	47
Gambar 14. Grafik hubungan antara fluks dan kedalaman.....	50
Gambar 15. Dosis gamma.....	51
Gambar 16. Dosis nitrogen.....	52
Gambar 17. Dosis boron.....	53
Gambar 18. Dosis total.....	54
Gambar 19. Dosis serap total.....	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Kode Input MCNPX.....	62
Lampiran 2. Perhitungan Massa Boron dalam Jaringan dan Penjabaran Persamaan untuk Geometri Otak.....	70
Lampiran 3. Perhitungan Laju Dosis Boron, Dosis Proton, Dosis Hamburan Neutron dan Dosis Gamma.....	73
Lampiran 4. Tabel Fraksi Dosis Gamma.....	76
Lampiran 5. Tabel Perbandingan Laju Dosis Gamma antara Konsentrasi8 20, 25, 30 dan 35 $\mu\text{gram/gram}$ Kanker.....	78
Lampiran 6. Tabel Perbandingan Laju Dosis Rekoil Proton antara Konsentrasi 20, 25, 30 dan 35 $\mu\text{gram/gram}$ Kanker.....	79
Lampiran 7. Tabel Perbandingan Laju Dosis Boron antara Konsentrasi 20, 25, 30 dan 35 $\mu\text{gram/gram}$ Kanker.....	80
Lampiran 8. Tabel Perbandingan Laju Dosis Hamburan Neutron antara Konsentrasi 20, 25, 30 dan 35 $\mu\text{gram/gram}$ Kanker.....	81
Lampiran 9. Tabel Perbandingan Laju Dosis Total antara Konsentrasi 20, 25, 30 dan 35 $\mu\text{gram/gram}$ Kanker.....	82
Lampiran 10. Tabel Perbandingan Waktu Iradiasi antara Konsentrasi 20, 25, 30 dan 35 $\mu\text{gram/gram}$ Kanker.....	83

Lampiran 11. Tabel Perbandingan Dosis Serap Total antara Konsentrasi

20, 25, 30 dan 35 μ gram/gram Kanker.....	84
---	----

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, kasus tumor otak semakin meningkat. Sayangnya, banyak dari kasus itu yang terdeteksi terlambat setelah gejala muncul. Saat ini yang mendapatkan perhatian khusus di dunia kesehatan adalah tumor. Tumor menjadi penyakit yang mendapat perhatian khusus karena terdapat beberapa sifat tumor yang bersifat *lethal* (mematikan). Tumor merupakan suatu massa jaringan yang tumbuh secara tidak normal. Tumor dapat bersifat jinak (*benigna*) maupun bersifat ganas (*maligna*/kanker) (American Cancer Society, 2014). Tumor ganas (kanker) merupakan perkembangan massa jaringan tubuh yang tumbuh secara cepat dan tidak terkendali. Pertumbuhan yang tidak terkendali tersebut diakibatkan oleh adanya mutasi gen P53. Gen P53 merupakan gen yang berfungsi untuk mengatur proses apoptosis sel atau proses kematian sel. Kerusakan pada gen P53 mengakibatkan sel yang rusak tidak mengalami apoptosis melainkan mengalami perubahan struktur sel. Perubahan struktur sel ini diawali dengan adanya perubahan rasio antara inti dan sitoplasma kemudian diikuti dengan kelainan dalam pembelahan sel (Berlianti, 2013).

Menurut *World Health Organization* (WHO) sebanyak 165 orang dari 100.000 populasi orang Indonesia yang meninggal akibat kanker setiap tahunnya (data 2008). Kanker serviks dan kanker nasofaring merupakan kanker yang paling banyak terjadi di Indonesia. Selain 2 kanker tersebut masih terdapat beberapa jenis kanker lain salah satunya adalah kanker yang berasal dari jaringan otak. Data statistik menunjukkan angka kasus kanker otak lebih rendah dibandingkan kanker lainnya. Kasus kanker otak yang terjadi di dunia adalah 2% dari keseluruhan kasus kanker di dunia. Karakteristik kanker otak adalah bersifat ganas sehingga *survival rate* (angka sembuh dari kanker) untuk kanker otak sangat rendah. Sekitar 13 orang yang meninggal setiap harinya akibat kanker ini (WHO, 2012).

Saat ini ada beberapa metode atau cara pengobatan kanker yang sudah ditemukan dan digunakan seperti metode radioterapi, metode pengambilan kanker

atau operasi dan metode kemoterapi. Setiap metode ini memiliki resiko tersendiri, misalnya metode operasi dimana efek dari pengobatan ini adalah pendarahan dan lambatnya pemulihan akibat operasi sehingga mengganggu aktivitas pasien.

Metode operasi adalah metode pengobatan kanker dengan jalan mengambil kanker dari tubuh manusia. Metode ini biasanya digunakan pada pengobatan tahap awal, dimana tumor masih bersifat jinak dan belum menyebar pada bagian tubuh lainnya (Akulapalli, 2010). Metode kemoterapi merupakan metode yang dapat dikombinasikan dengan metode operasi. Metode ini menggunakan obat-obatan untuk membunuh sel kanker.

Obat-obat ini berfungsi untuk merusak sel yang membelah diri misalnya sel kanker, tetapi sel sehat yang membelah diri juga terkena efek kemoterapi. Kulit, sumsum tulang, usus dan folikel rambut merupakan bagian tubuh yang sering terkena dampak kemoterapi karena memiliki sel yang terus tumbuh dan membelah diri (Akulapalli, 2010). Pengobatan kanker dengan metode radioterapi digunakan 3 tahun setelah sinar-x ditemukan oleh Roentgen pada tahun 1896. Menurut Akulapalli radioterapi merupakan teknik terapi untuk merusak sel DNA kanker dengan menggunakan sumber radiasi tinggi yang berasal dari radioisotop maupun sumber buatan sehingga DNA kanker tidak dapat membelah lagi, tetapi metode radioterapi memiliki resiko yang berbahaya karena pengobatan ini dapat menjadi penyebab kanker yang baru.

Dengan perkembangan teknologi ditemukan salah satu metode radioterapi yang aman untuk pengobatan kanker yaitu *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT). Terapi dengan menggunakan BNCT memiliki beberapa kelebihan sebagai berikut.

1. Senyawa boron yang dikonsentrasikan ke dalam tumor tidak memiliki sifat toksik pada rentang konsentrasi 20 µgram/g sampai 35 µgram/g.
2. Dosis terlokalisasi.
3. BNCT menggunakan partikel alfa untuk mengionisasi sel sel kanker. Keunggulan dari ionisasi partikel alpha ini adalah partikel alpha tidak membutuhkan oksigen untuk meningkatkan nilai *Relative Biological Effectiveness* (RBE)nya.

4. Keunggulan lain dari BNCT adalah partikel alfa mampu membunuh sel kanker baik yang sedang dalam fase membelah maupun sedang dalam fase tidak membelah, berbeda dengan terapi kemoterapi yang bekerja optimal pada saat sel membelah.

Komponen utama dari terapi BNCT adalah senyawa Boron dan sumber neutron. Senyawa boron merupakan senyawa radiofarmaka yang dapat membawa boron ke dalam otak. Senyawa ini harus memiliki karakteristik yang dapat menembus *Brain Barrier System* (Sistem pertahanan otak dari senyawa asing). Sumber neutron yang digunakan dalam BNCT dapat berasal dari reaktor nuklir maupun generator neutron. Neutron yang digunakan adalah neutron termal dan neutron epitermal.

Neutron termal merupakan neutron yang memiliki energi 1meV-1eV dengan suhu 20 °C. Sedangkan neutron epitermal merupakan neutron yang memiliki energi 1keV-10keV. Neutron termal memiliki daya tembus yang lebih rendah dibandingkan dengan neutron epitermal sehingga untuk tumor pada kedalaman tertentu di dalam jaringan dibutuhkan neutron epitermal.

Penyembuhan kanker otak dengan BNCT perlu memperhitungkan dosis gamma, dosis alfa, dosis recoil proton, dosis total, dosis serap total dan waktu iradiasi. Dosis serap total untuk membunuh jaringan kanker adalah 30 Gy, sedangkan dosis serap lainnya dibutuhkan dosis serap kurang dari 3 Gy.

Konsentrasi boron yang diperlukan untuk membunuh jaringan kanker harus disesuaikan agar jaringan kanker mati tetapi jaringan lain tidak rusak. Hal ini berkaitan dengan waktu iradiasi yang optimal. Oleh karena itu diperlukan penelitian dengan variasi konsentrasi boron dan waktu iradiasi.

B. Identifikasi masalah

Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan pada latar belakang di atas, maka dapat diidentifikasi beberapa permasalahan yaitu sebagai berikut.

1. Perlunya diteliti konsentrasi boron yang optimal untuk membunuh jaringan kanker tanpa merusak jaringan sehat lainnya.

2. Boron-10 merupakan salah satu nuklida non radioaktif yang dapat digunakan untuk penyembuhan kanker dengan metode BNCT tetapi belum sepenuhnya digunakan secara maksimal untuk pengobatan kanker

C. Pembatasan masalah

1. Jenis kanker yang dipilih adalah kanker otak dimana letak kanker berada di bagian lobus frontalis dengan kedalaman 3,3 cm, berdiameter 4 cm dan memiliki tingkat stadium 4.
2. Efek kerusakan sel yang berasal dari reaksi hidrolisis air dan radikal bebas tidak diperhitungkan.
3. Sumber neutron berasal dari Desain Konseptual Keluaran Kolimator Kolom Termal milik Nina Fauziah (2013) Reaktor Riset *Kartini* untuk *Boron Neutron Capture Therapy*.
4. Pembagian boron-10 di jaringan kanker adalah 90% dari total boron, jaringan lainnya seperti cranium, soft tissue dan cerebrum mendapat 1/10 dari jumlah boron-10 di jaringan kanker.

D. Rumusan masalah

Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan pada latar belakang di atas didapatkan beberapa permasalahan yaitu sebagai berikut.

1. Berapa konsentrasi boron-10 yang optimal untuk terapi kanker otak?
2. Berapa waktu iradiasi yang paling singkat untuk terapi kanker otak?

E. Tujuan penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui konsentrasi boron-10 pada rentang konsentrasi 20 $\mu\text{gram/g}$ sampai 35 $\mu\text{gram/g}$ yang optimal untuk terapi kanker otak dengan metode BNCT.
2. Mengetahui waktu iradiasi yang paling singkat untuk terapi kanker otak.

F. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi beberapa pihak sebagai berikut.

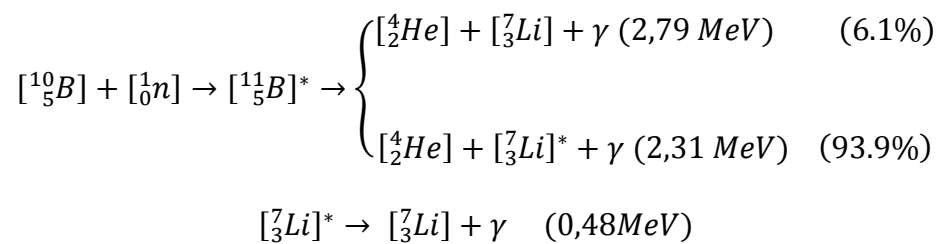
1. Bagi dokter, fisikawan, dan rekayasawan dari bidang medis untuk merancang dan mengembangkan terapi kanker otak dengan BNCT.
2. Bagi para peneliti berikutnya agar dapat melakukan penelitian lebih lanjut untuk stadium dibawah 4.

BAB II

STUDI PUSTAKA

A. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

BNCT merupakan teknik terapi kanker yang menggunakan prinsip fisika pada reaksi nuklir yang terjadi ketika Boron stabil (Boron-10) diiradiasi dengan menggunakan neutron berenergi rendah (neutron termal). Boron-10 memiliki tampang lintang mikroskopik interaksi tangkapan dengan neutron termal yang tinggi yaitu 3863,7 barn (dibandingkan Nitrogen yang hanya 1.81 barn). Tampang lintang menunjukkan kemungkinan suatu radiasi untuk berinteraksi dengan suatu materi. Teknik ini diperkenalkan oleh Locher, seorang biofisikawan dari institusi Franklin di *Pennsylvania*. Reaksi Boron-10 dengan neutron termal akan menghasilkan partikel Boron-11m ($t_{1/2}=10^{-23}$ detik) dan akan meluruh kemudian memancarkan partikel alfa ($E_{\text{rerata}}=2.33\text{MeV}$), Lithium-7 dan foton gamma ($E_{\text{rerata}}=0.48\text{ MeV}$). Jangkauan yang dimiliki alfa adalah 8 μm dan Lithium-7 adalah 5 μm . Jangkauan tersebut dapat memastikan bahwa pengaruh reaksi pada BNCT hanya terlokalisasi di sel kanker dengan diameter 6 μm .

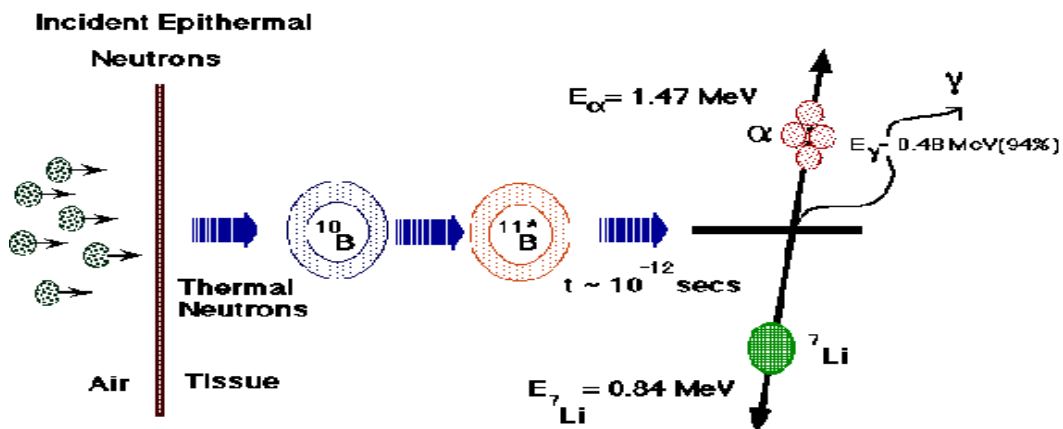


Efektivitas dari BNCT sangat dipengaruhi oleh dua komponen yaitu komponen fisik (fluks neutron yang digunakan untuk iradiasi) dan komponen kimia (senyawa boron yang terkonsentrasi di dalam jaringan tumor). Uji klinis yang dilakukan saat ini mengutamakan pada pengujian komponen boron yang

mampu terkonsentrasi secara maksimal di dalam jaringan tumor dengan rasio konsentrasi boron di tumor dengan di jaringan normal setinggi mungkin.

Sampai saat ini senyawa boron yang telah melalui uji klinis adalah *Sodium Borocaptate* (BSH) dan *Boron phenylalanine* (BPA) sedangkan senyawa boron yang lain masih dalam tahap penelitian. Berdasarkan uji klinis yang dilakukan BPA memiliki karakteristik terkonsentrasi di dekat nukleus sel (Tetsuya et al, 2011).

Perbandingan konsentrasi ^{10}B pada sel kanker dan sel sehat adalah 10:1, sehingga penelitian ini bersifat selektif karena peluang neutron bereaksi dengan ^{10}B yang terkonsentrasi lebih besar pada sel kanker (Sauerwein, et al, 1993).



Gambar 1. Reaksi Boron-10 dan neutron termal (MIT, 2008).

B. Senyawa Boron

Senyawa pembawa boron yang digunakan merupakan salah satu komponen yang sangat penting di dalam terapi dengan menggunakan BNCT. Senyawa boron yang baik adalah senyawa boron yang mampu terkonsentrasi sebanyak-banyaknya di dalam tumor sedangkan pada jaringan di sekitar tumor senyawa boron seminimal mungkin. Untuk menunjang keberhasilan suatu terapi, senyawa terboronasi sebagai agen target (targeting agent) yang ideal hendaknya mempunyai karakter sebagai berikut: (1) selektivitas yang tinggi, (2) toksisitas rendah (3) kelarutan yang sesuai di dalam air karena sistem dalam sel tersusun

sebagian besar berupa air sebagai pelarut, dan (4) penyerapan yang tinggi oleh sel kanker. (Huang, 2009 ; Zesgin ,2010).

Agen pengiriman Boron-10 memiliki tiga generasi. Pertama Boron Phenylalanine atau BPA (Shintaro Ishiyama, 2014). BPA dianggap sebagai wakil dari generasi pertama dari senyawa boron-10 dan jenis dari agen pengiriman boron-10 untuk BNCT. Kedua, Natrium borocaptate ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$) atau BSH. BSH dapat dianggap sebagai generasi kedua dari senyawa boron-10 dan sebagai jenis agen pembawa boron-10 untuk BNCT. BSH diterapkan dalam uji klinis di Amerika Serikat, Eropa dan Jepang (Suzuki et al, 2013). Ketiga, pengembangan dari generasi ketiga dari agen pengiriman boron-10 adalah faktor yang secara langsung paling penting dalam mempengaruhi keberhasilan dari BNCT.

Hal ini dikarenakan adanya hasil klinis dari BPA dan BSH untuk BNCT yang kurang memuaskan. Sehingga munculah agen pengiriman boron generasi ketiga yang mengadopsi dari kelompok senyawa boron yang sudah stabil ke bagian tumor target. Boron polyhedral, porfirin, asam amino, liposom, poliamina, merupakan beberapa dari jumlah agen generasi ketiga (Huang, 2009).

Pada Glioblastoma pemilihan senyawa boron menjadi sangat penting karena di dalam otak manusia terdapat suatu sistem pertahanan yaitu Blood Brain Barrier (BBB). Blood Brain Barrier merupakan sistem pertahanan otak yang bertujuan untuk mencegah masuknya partikel asing ke dalam sistem syaraf pusat. Proses infuse (pemasukan senyawa boron ke dalam tubuh) untuk BPA membutuhkan waktu 2-4 jam. Dalam jangka waktu tersebut jumlah boron-10 yang terakumulasi di dalam jaringan tumor terakumulasi optimal.

Proses infuse boron ke dalam tubuh sangat berpengaruh terhadap jumlah boron yang terakumulasi ke dalam jaringan tumor. Dua tipe penyuntikan boron adalah *intravena* (i.v) dan *intracarotidly* (i.c).

Intravena merupakan penyuntikan senyawa boron melalui pembuluh vena sedangkan penyuntikan secara *intracarotidly* merupakan penyuntikan senyawa boron melalui arteri internal di kelenjar carotis. Penyuntikan senyawa boron

secara i.c menunjukkan penurunan efek BBB dan meningkatkan rasio konsentrasi boron di tumor dan di darah.

Jumlah senyawa boron yang dimasukkan ke dalam tubuh pasien akan berpengaruh juga pada waktu iradiasi yang dibutuhkan. Semakin banyak senyawa boron yang dimasukkan ke dalam tubuh pasien semakin singkat pula waktu iradiasi yang dibutuhkan. Akan tetapi senyawa boron memiliki sifat toksik di dalam tubuh pada konsentrasi tertentu.

Berdasarkan uji klinis yang dilakukan boron tidak bersifat toksik pada konsentrasi 3000-6000mg pada anak-anak dan 15000-20000 pada dewasa. Boron di dalam tubuh akan dimetabolisis dan dikeluarkan melalui urin. Senyawa BPA yang disuntikkan ke dalam tubuh pasien adalah kurang dari 900 mg/kg berat badan pasien dengan konsentrasi boron di jaringan tumor sebanyak 10-35 μg boron/g jaringan tumor. Toksisitas litium juga merupakan faktor yang perlu diperhatikan dalam menentukan jumlah senyawa boron yang disuntikkan ke dalam tubuh pasien. Hal ini karena radiasi boron menghasilkan litium-7.

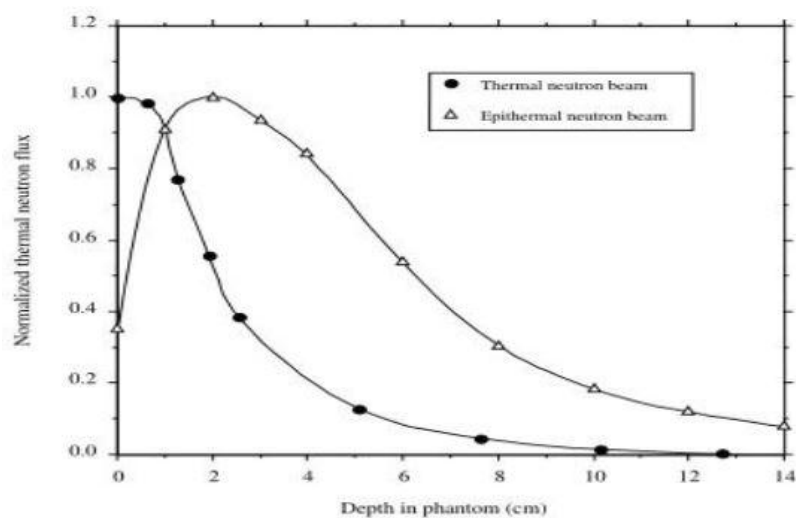
Litium ini memiliki batas dosis di dalam tubuh manusia yaitu sebesar 900-1800 mg/hari atau 1,5-2,5 meQ/L. Konsentrasi litium yang melebihi 3,5 meQ/L dapat berakibat fatal bagi manusia (Tripathi, 1997; Barkirdere, 2010).

1. Sumber Neutron

Sumber neutron adalah kunci lain dari keberhasilan BNCT dalam mengobati kanker. Sumber neutron yang digunakan dalam BNCT dapat berasal dari reaktor nuklir maupun generator neutron. Neutron yang digunakan adalah neutron termal dan neutron epitermal. Neutron termal merupakan neutron yang memiliki energi 1 meV-1eV dengan suhu 20°C.

Neutron epitermal merupakan neutron yang memiliki energi 1keV-10keV. Neutron termal memiliki daya tembus yang lebih rendah yaitu 2,5 cm dari permukaan jaringan, dibandingkan dengan neutron epitermal yaitu 3-6 cm, sehingga untuk tumor pada kedalaman tertentu di dalam jaringan dibutuhkan neutron epitermal (John D,et.al,2013).

Sumber neutron dalam melakukan penelitian ini yaitu sumber neutron dari keluaran kolimator kolom termal (Nina Fauziah, 2013). Perbandingan kurva energi fluks neutron termal dan epitermal berdasarkan kedalaman kulit ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 . Kurva distribusi fluks neutron termal dan neutron epitermal (IAEA, 2001).

Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa neutron epitermal mulai mengalami penurunan nilai fluks neutron dan memiliki nilai fluks neutron yang sama dengan neutron termal ketika menembus permukaan kulit dengan kedalaman 2 – 3 cm dan turun secara eksponensial pada kedalaman selanjutnya. Fluks neutron termal mengalami penurunan nilai fluks sejak menyentuh permukaan kulit. Karena alasan inilah neutron termal sesuai dengan pengobatan kanker permukaan kulit. Dalam

penelitian ini digunakan neutron epitermal karena kanker otak berada pada kedalaman 3,3 cm.

Dalam penelitian ini, kriteria dari neutron keluaran kolimator kolom termal ditunjukkan oleh Tabel 1 (IAEA, 2001).

Tabel 1. Keluaran Kolimator Kolom Termal.

Parameter	Nilai
Diameter <i>aperture</i> (cm)	5
$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$1,65 \times 10^9$
$\dot{D}_f / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$1,59 \times 10^{-13}$
$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$1,16 \times 10^{-13}$
ϕ_{th}/ϕ_{epi}	0,007
J/ϕ_{epi}	0,72

Sumber: (IAEA, 2001).

Standar keluaran neutron dari kolimator digunakan untuk memastikan kualitas dari desain yang telah dibuat. Standar yang digunakan berasal dari *International Atomic Energy Agency* (IAEA). Besar parameter yang disediakan oleh IAEA disajikan pada Tabel 2. Semua parameter yang terdapat pada Tabel 1 untuk desain kolimator dari kolom termal, sudah memenuhi dari rekomendasi IAEA.

Tabel 2. Rekomendasi IAEA untuk neutron keluaran kolimator.

Parameter	Notasi (satuan)	Rekomendasi IAEA
Fluks neutron epitermal	$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$> 1,0 \times 10^9$
Rasio laju dosis neutron cepat dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_f / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio laju dosis gamma dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio antara fluks termal dan epitermal	ϕ_{th}/ϕ_{epi}	$< 0,05$
Rasio antara arus neutron dan fluks neutron	J/ϕ_{epi}	$< 0,7$

Sumber: IAEA (2001)

2. MCNPX

Program MCNPX atau dapat disebut sebagai *Monte Carlo N-particle eXtended* adalah tujuan umum Monte Carlo kode transportasi radiasi dirancang untuk mengetahui banyaknya jenis partikel dengan rentang energi yang lebih luas. Versi ini adalah lanjutan dari MCNP yang telah dimulai di *Los Alamos National Laboratory* sekitar 60 tahun yang lalu. MCNPX versi 2.6.0 adalah *computer code* terakhir yang dirilis oleh *Radiation Safety Information Computational Center* (RRSIC) yang mengikuti MCNPX versi sebelumnya.

Pada MCNPX versi 2.6.0 telah dimasukan beberapa kemampuan baru terutama untuk analisis transmudasi, *burn up* dan produksi partikel tunda. Beberapa mode perhitungan (*tally*) dan metode baru reduksi varians juga telah dikembangkan untuk teknik analisis data yang lebih baik. MCNPX ini juga sesuai untuk menjalankan kode di MCNP5 kecuali kode yang terkait fitur-fitur baru yang

belum ada di MCNP5. Adapun Manfaat MCNPX yang telah ada selama ini adalah sebagai berikut (Denise, 2008).

- a. Desain Akselerator untuk fasilitas hamburan neutron,
- b. Penyelidikan untuk produksi akselerator isotop dan merusak program, transmudasi pada limbah nuklir,
- c. Akselerator berbasis teknologi citra seperti radiografi neutron dan proton,
- d. Desain perisai teknologi akselerator,
- e. Aktivasi komponen akselerator sekitar tanah dan udara,
- f. Dosimetri energi tinggi dan deteksi neutron,
- g. Fisika medis terutama terapi proton dan neutron,
- h. Investigasi radiasi sinar kosmik latar dan prisa radiasi untuk pesawat luar angkasa,
- i. Analisis gangguan semikonduktor karena radiasi kosmik di komponen pesawat angkasa oleh neutron,
- j. Analisis Transmutasi aktivasi dan *burn up* di reaktor dan sistem lainnya,
- k. Analisis keselamatan Nuklir,
- l. Analisis kritikalitas berkaitan dengan keselamatan,
- m. Deteksi matrial Nuklir.

Batasan energi radiasi yang dapat disimulasikan yaitu sebagai berikut.

- a. Rentang energi neutron (0-20 MeV) untuk semua isotop,
- b. Rentang energi neutron (0-150 MeV) untuk 42 isotop tertentu dan hanya sampai 100 MeV untuk ^9Be ,
- c. Rentang energi Foton (0-100 GeV),

- d. Rentang energi elektron (1 KeV- 1 GeV),
- e. Rentang energi proton (1-150 MeV).

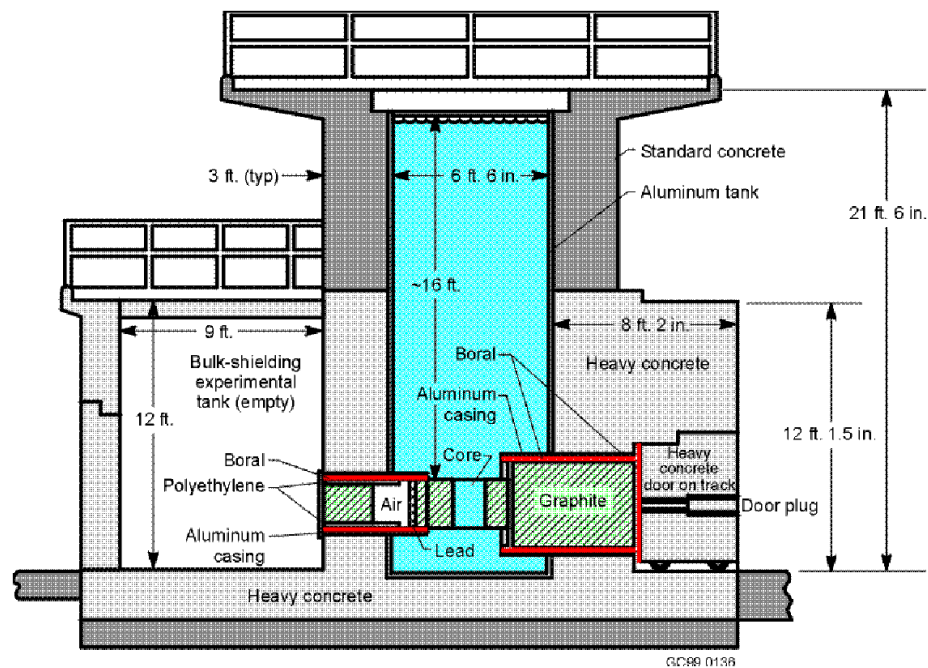
3. Reaktor Kartini

Reaktor Kartini yang terletak di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta adalah salah satu fasilitas yang dimiliki oleh Pusat Sains dan Teknologi Akselerator-Badan Tenaga Atom Nasional (PSTA-BATAN). Mulai dibangun pada tahun 1974 dan pertama kali beroperasi pada tahun 1979. Reaktor Kartini merupakan reaktor riset jenis TRIGA (*Training Research Isotop production/Irradiation General Atomic*) dengan disain sebagai reaktor tipe kolam 250 kW dengan daya operasi 100 kW. Reaktor Kartini dimanfaatkan untuk tujuan Penelitian, Irradiasi, Pendidikan dan Pelatihan.

a. Teras Reaktor

Teras reaktor adalah tempat berlangsungnya reaksi pembelahan bahan bakar nuklir. Teras reaktor ditempatkan didalam sumur reaktor yang terbuat dari beton sebagai perisai radiasi.

Teras reaktor berbentuk silinder terdiri dari kisi-kisi terdapat dudukan elemen–elemen bahan bakar dan batang-batang kendali. Teras reaktor dikelilingi oleh grafit yang berfungsi memantulkan neutron (reflektor), susunan teras reflektor ini mempunyai diameter 1,09 m dan tinggi 0,58 m ditempatkan pada suatu dudukan/bangku reflektor. Teras dan reflektor berada didalam tangki reaktor yang berisi air. Bagian terbawah dari reflektor berada pada ketinggian 0,61 m dari dasar tangki. Sedangkan ketinggian air dari bagian atas reflektor adalah 4,9 m, berfungsi sebagai pendingin juga sebagai perisai radiasi kearah vertikal.



Gambar 3. Skema Teras Reaktor TRIGA (Ravnik,1999)

b. Moderator

Moderator merupakan bahan yang mempunyai fungsi sebagai pelambat neutron. Moderator yang dipakai adalah air ringan dan Zirkonium Hidrida (ZrH).

c. Reflektor

Reflektor berupa sebuah ring silinder dari grafit dipasang menyelubungi teras reaktor yang berada seakan-akan di dalam kaleng alumunium, dimaksudkan untuk menjaga agar tidak ada kontak langsung antara air dengan grafit, berfungsi sebagai reflektor neutron. Pada reflektor ini terdapat lekukan atau sumur berbentuk ring digunakan sebagai fasilitas irradiasi dalam teras.

Lekukan ini juga dibatasi oleh logam alumunium, merupakan satu kesatuan dari reflektor dirancang untuk menempatkan perangkat irradiasi rak putar. Dimensi reflektor ini mempunyai diameter dalam 45,7 cm dengan ketebalan 30,5 cm dan tinggi 55,9 cm. Reflektor ini mempunyai beberapa bagian untuk menempatkan fasilitas irradiasi sebagai berikut ini.

- 1) Sebuah lubang melingkar diseluruh permukaan atas reflektor, digunakan untuk penempatan rak putar (*Lazy Suzan*) dengan lebar radial 10,2 cm dan kedalaman 25,5 cm.

- 2) Sebuah lubang menembus reflektor sampai ke permukaan bagian dalam secara radial dari samping digunakan untuk memasang sebuah tabung berukuran diameter 16,8 cm dan tebal 0,71 cm.

d. Tabung Berkas Neutron (*Beamport*)

Pada Reaktor Kartini terdapat 4 *beamport* yaitu: *beamport* arah tangensial (1 buah) dan *beamport* arah radial (3 buah). Beberapa fungsi dari *beamport* yaitu menyediakan berkas neutron dan gamma untuk keperluan eksperimen dan untuk fasilitas iradiasi bahan-bahan berukuran besar.

Tabung saluran berkas neutron mempunyai diameter 19,5 cm dengan arah horizontal menembus perisai beton dan tangki reaktor ke permukaan reflektor. Fasilitas *beamport* ini berguna untuk menyediakan berkas neutron untuk berbagai eksperimen dan untuk fasilitas radiasi neutron bahan yang relatif besar (berdiameter 15,2 cm).

Terdapat dua buah *beamport* dengan arah radial terhadap teras *beamport* tembus arah radial hingga ke teras reaktor dan *beamport* yang terpasang secara tangensial.

e. Kisi Reflektor

Lempeng kisi reaktor bagian atas terbuat dari aluminium berdiameter 49,5 cm dan tebal 19 mm, jarak lubang-lubang kisi dibuat sedemikian presisinya untuk digunakan sebagai lubang tempat bahan bakar.

f. Batang Kendali

Batang kendali digunakan untuk mengoperasikan reaktor/*start-up*, mengatur tingkat daya reaktor dan mematikan reaktor. Ujung atas dari batang kendali ini dihubungkan dengan alat penggerak/motor batang kendali di atas tangki reaktor.

g. Tangki Reaktor

Terbuat dari aluminium tebal 6 mm, diameter 2 m. Tangki digunakan sebagai pemisah antara air (sebagai pelambat neutron dan pendingin reaktor) dengan beton perisai radiasi. Pada tangki ini diletakkan teras reaktor beserta perlengkapannya.

h. Kolom Thermal

Pada Reaktor Kartini terdapat dua kolom thermal yang berisi grafit. Fungsi dari kolom thermal ini adalah untuk eksperimen irradiasi dari sampel yang khusus memerlukan radiasi neutron thermal.

Kolom thermal terbuat dari grafit yang berukuran 1,20 m x 1,20 m x 1,60 m memanjang dari sisi luar reflektor ke permukaan sebelah dalam pintu tertutup. Pintu penutup ini terbuat dari beton berat dan untuk membuka/menutup digunakan motor penggerak yang berjalan di atas rel.

Fungsi kolom thermal adalah untuk eksperimen irradiasi sampel yang khusus memerlukan radiasi neutron thermal. Sedangkan ukuran sampel yang dapat dirradiasi maksimum 10 cm x 10 cm.

i. Bahan Bakar

Reaktor Kartini menggunakan bahan bakar TRIGA, U-ZrH tipe 104 dan tipe 204 buatan General Atomic. Elemen bahan bakar merupakan campuran homogen bahan bakar uranium dan moderator zirkonium hibrida (U-ZrH), berbentuk padat dan setiap elemen rata-rata mengandung Uranium ^{235}U 8% berat dengan pengkayaan 20%. Di dalam bahan bakar normal terkandung 36-38 gram ^{235}U , dengan berat total 3 kg setiap elemen.

Disamping itu Reaktor Kartini mempunyai elemen bahan bakar tiruan (dummy). Bentuk dan ukuran sama dengan elemen bahan bakar dan tersusun dari

grafit. Fungsi dari elemen bahan tiruan ini adalah untuk menaikkan efisiensi neutron dalam teras (berfungsi sebagai reflektor).

j. Rak Putar (*Lazy Susan*)

Fasilitas irradiasi *Lazy Susan* adalah sebuah fasilitas irradiasi yang mengelilingi teras reaktor terletak di bagian luar reflektor. Fasilitas ini mempunyai 40 lubang tempat radiasi, dapat digunakan secara bersama-sama dan dapat diputar. Tiap lubang (tabung) mempunyai ukuran diameter dalam 55,8 cm dan diameter luar 70 cm. Tiap lubang dalam rak putar dapat diisi sampai 2 container (ditumpuk). Sampel yang akan diirradiasi akan dimasukkan dalam satu ampul, pemasukan dan pengeluaran ampul pada fasilitas ini dilakukan melalui sebuah tabung pengarah yang dapat diatur dari atas reaktor.

Sampel yang diirradiasi dimasukkan ke dalam container, berukuran panjang 13,6 cm dan diameter luar 2,84 cm. masing-masing lubang dalam fasilitas ini dapat diisi sampel dua tabung ampul. Fasilitas ini biasanya digunakan untuk mengirradiasi sampel yang mempunyai umur panjang.

k. *Pneumatic Transfer Sistem*

Sistem *transfer pneumatic* digunakan untuk eksperimen irradiasi sampel yang menghasilkan radionuklida berumur pendek. Sampel yang akan diirradiasi dapat dimasukkan maupun diambil dari teras reaktor secara otomatis dalam waktu yang singkat.

l. Saluran Tengah

Saluran tengah didesain untuk keperluan eksperimen irradiasi di daerah yang mempunyai fluks neutron maksimum. Saluran tengah ini berupa tabung yang

berdiameter 2,4 cm dan panjang 600 cm. Tabung ini terletak di tengah-tengah tangki reaktor dan memanjang dari atas sampai ke penyangga teras.

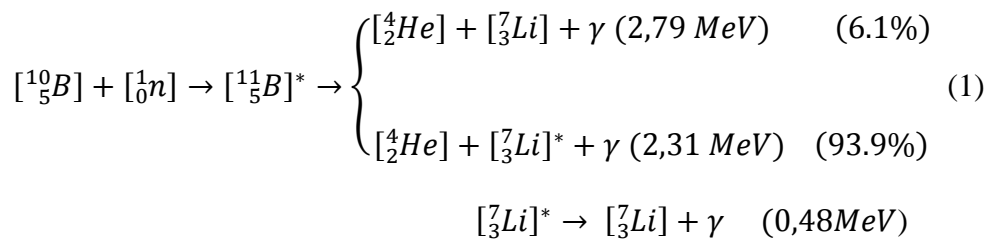
Di dasar tabung terdapat 4 buah lubang yang berguna untuk jalan masuk air ke dalam tabung selama reaktor beroperasi. Lubang memiliki ukuran berdiameter 1,8 cm dan panjang 5,6 cm.

C. Dosis Kanker

Terapi pengobatan kanker dengan BNCT menggunakan radiasi neutron termal dan epitermal sebagai pembunuh jaringan kanker yang mengandung boron-10. Faktanya tidak semua boron-10 yang digunakan untuk pengobatan terdistribusi di jaringan kanker saja, tetapi ada kemungkinan boron-10 juga dapat terdistribusi ke sel sehat sehingga dapat terkena dampak dari efek radiasi neutron termal. Selain itu ada beberapa unsur tubuh yang memiliki kecenderungan berinteraksi dengan neutron termal, misalnya hydrogen dan nitrogen. Ada empat dosis yang perlu diperhatikan yaitu sebagai berikut.

1. Dosis Boron (D_B)

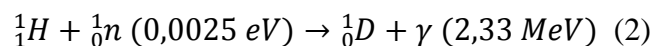
Dosis boron dihasilkan dari interaksi neutron dengan boron yang telah diinjeksikan ke jaringan kanker akan memiliki peluang interaksi yang tinggi karena boron memiliki tampang lintang yang sangat tinggi yaitu 3863,7 barn. Reaksi yang terjadi antara interaksi boron-10 dengan neutron ditunjukkan pada persamaan (1) (IAEA, 2001):



Boron-10 yang berinteraksi dengan neutron termal akan berubah menjadi boron-11 yang memiliki waktu paro yang sangat singkat yaitu 10^{-12} detik. Boron-11 tersebut akan meluruh dengan menghasilkan lithium dan alfa dengan energi sebesar 2,79 MeV (hanya 61% dari interaksi total) serta lithium dan alfa dengan energy sebesar 2,31 MeV (93,9% dari interaksi total). Lithium yang dihasilkan dari reaksi peluruhan kembali ke tingkat energi awalnya akan memancarkan gamma (0,48MeV). Energi rerata yang dihasilkan dari interaksi antara neutron dan boron-10 adalah 2,33 MeV (IAEA, 2001).

2. Dosis Gamma (D_γ)

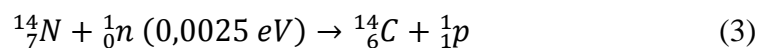
Dosis radiasi gamma didapat dari sumber iradiasi neutron dan interaksi antara neutron termal dan hidrogen dalam tubuh yang akan menghasilkan gamma dan hidrogen-2. Hidrogen-2 yang dihasilkan merupakan atom yang tereksitasi. Hidrogen tereksitasi ini tidak memiliki waktu paro. Laju produksi hidrogen-2 dari inetraksi neutron termal dengan hydrogen-1 sebanding dengan laju pelepasan foton dengan energy 2,33 MeV. Interaksi antara neutron termal dengan hydrogen ditunjukkan pada persamaan (2) (IAEA, 2001) :



Gamma dengan energi 2,33 MeV pada persamaan (2) yang akan dihitung pada penelitian ini adalah dosis akibat reaksi neutron termal dengan Hidrogen (IAEA, 2001).

3. Dosis Radiasi Proton (D_p)

Nitrogen-14 memiliki fraksi massa yang cukup tinggi yaitu 4,5% dari massa jaringan. Iradiasi jaringan oleh neutron termal mengakibatkan adanya interaksi neutron termal dengan Nitrogen-14. Reaksi ini menghasilkan Karbon-14 dan proton dengan energi 0,66 MeV. Karbon-14 merupakan unsur radioaktif dengan umur paro panjang yaitu 5730 tahun. Interaksi neutron termal dengan Nitrogen dapat digambarkan dengan persamaan (3).



Dosis yang akan dihitung pada persamaan (3) penelitian ini adalah dosis proton akibat reaksi neutron termal dengan Nitrogen-14. Pada reaksi (7), Karbon-14 memiliki aktivitas sekitar 3 kBq dengan dosis ekuivalen sebesar 12 $\mu\text{Sv/th}$. Aktivitas dan dosis ekuivalen yang berasal dari Karbon-14 dapat diabaikan dalam penelitian ini karena dosisnya terlalu kecil dibandingkan dengan batas dosis Karbon-14 yang terdapat dalam tubuh manusia. Karbon-14 juga merupakan isotop alami yang sudah terdapat dalam tubuh manusia (IAEA, 2001).

4. Dosis Hamburan Neutron

Reaktor sebagai sumber neutron yang digunakan tidak hanya menghasilkan neutron termal dan epitermal saja akan tetapi juga menghasilkan neutron cepat. Dalam neutron cepat ada berkas radiasi lain yang tidak diinginkan oleh karena karkternya seperti proton dengan LET

tinggi dan radikal bebas (IAEA, 2001), sehingga dosis total yang diterima oleh suatu organ tubuh adalah sebagai berikut.

$$\dot{D}_{total} = (w_{Alfa} \times \dot{D}_{Alfa}) + (w_p \times \dot{D}_{proton}) + (w_n \times \dot{D}_{neutron}) + (w_\gamma \times \dot{D}_\gamma) \quad (4)$$

keterangan :

w_{Alfa} : faktor kualitas radiasi dari alfa

w_p : faktor kualitas radiasi dari proton

w_n : faktor kualitas radiasi hamburan neutron

w_γ : faktor kualitas radiasi gamma

D. Kanker Otak

Tumor di dalam otak disebut juga dengan *glioma* merupakan jaringan tidak normal yang tumbuh dari sel-sel penyusun jaringan otak. *Glioblastoma* atau *glioblastoma multiform* merupakan salah satu jenis dari *glioma* yang memiliki *grade* paling tinggi. *Grade* dari jaringan tumor menunjukkan keganasan tumor dan kecepatan tumbuh dari jaringan tumor. Pertumbuhan tidak normal dari sel tersebut dapat mengakibatkan adanya masa yang menekan jaringan otak, sehingga otak tidak dapat bekerja secara optimal (WHO, 2012).

Glioma sendiri merupakan jenis tumor yang dimulai dari organ otak atau bisa saja tulang belakang. Tumor tersebut berasal dari sel-sel glial sehingga dinamakan Glioma. Glioma dapat diklarifikasikan sebagai berikut.

1. Astrocytomas

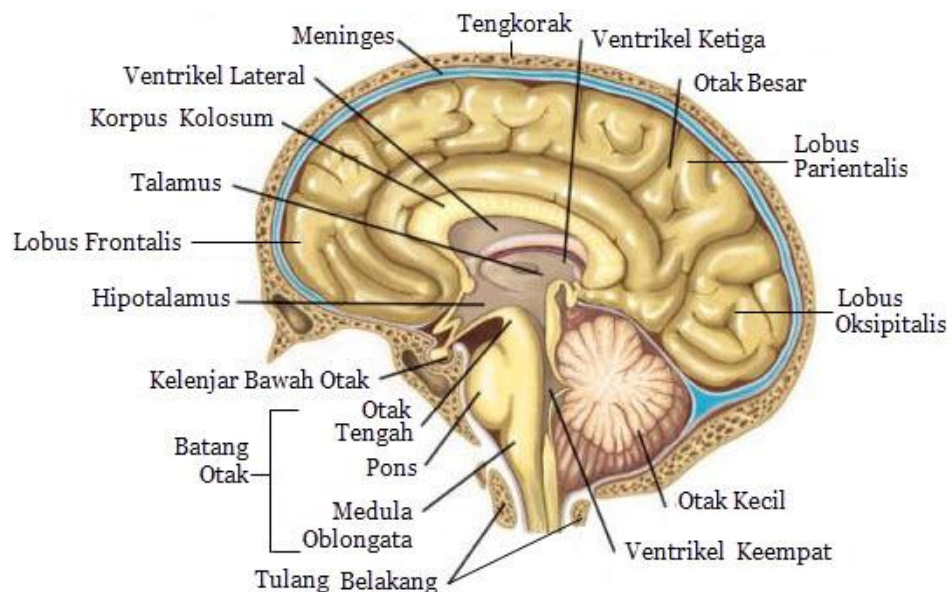
Astrocytomas merupakan jenis yang paling umum yang bisa ditemukan pada anak-anak dan orang dewasa. Namun dari kebanyakan kasus jenis ini banyak menyerang anak-anak. Awal mulanya berkembang dari sel atrosit, yaitu sel-sel otak yang mendukung sel-sel saraf (neuron). Astrocytomas sendiri bisa bersifat jinak dan ganas.

2. Oligodendrogliomas

Tumor otak ini berkembang dari sel-sel bernama oligodendrocytes yang membuat zat lemak putih menutupi saraf pada otak yang disebut myelin. Oligodendrogliomas yang paling sering ditemukan di otak besar, di lobus temporal dan lobus frontalis.

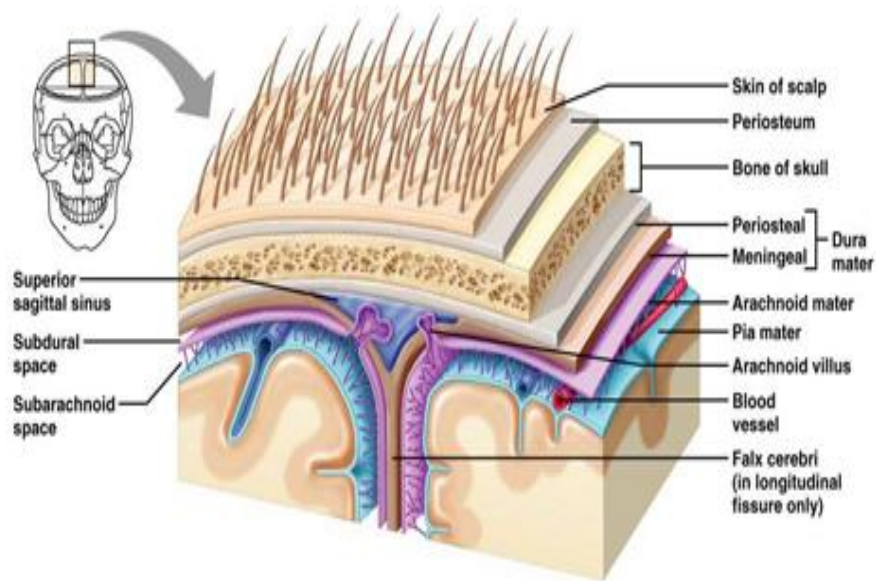
3. Ependymomas

Jenis tumor ini berasal dari sel-sel bernama ependymal. Sel-sel ini melapisi daerah diisi cairan otak atau ventrikel dan sumsum tulang belakang.



Gambar 4 . Struktur Jaringan Otak (Sridianti, 2015)

Gambar 4 menunjukkan Struktur Jaringan Otak. Menurut Berlianti (2013) *Glioblastoma multiform* paling sering terjadi pada lobus frontalis. Hal ini dikarenakan *glue cell* yang paling sering tumbuh menjadi *Glioblastoma* berada pada bagian *cerebral cortex* (lobus otak). Lobus frontalis merupakan bagian paling depan dari otak, yang memiliki fungsi kognitif pada manusia. Lobus frontalis merupakan bagian paling besar dibandingkan bagian lain di dalam otak. Volume dari lobus ini mencapai 32,37 % dari volume otak total.



Gambar 5 . Lapisan otak (Sridianti, 2015)

Pemodelan geometri otak berbentuk ellipsoid dengan diameter 21,2 cm. Letak kanker berada pada lobus frontalis dengan kedalaman 3,3 cm dari permukaan kulit. Gambar 5 menunjukkan lapisan otak dengan ukuran sebagai berikut.

- a. Kulit kepala dengan ketebalan 0,6 cm.
- b. *Cranium* dengan ketebalan 0,6 cm.
- c. *Soft tissue* dengan ketebalan 0,6 cm.
- d. *Cerebrum* dengan diameter 16,7 cm.
- e. *Planning Tumor Volume* (PTV) dengan ketebalan 0,3 cm.
- f. *Clinical Tumor Volume* (CTV) dengan ketebalan 0,5 cm.
- g. *Gross Tumor Volume* (GTV atau kanker) dengan diameter 4 cm.

E. Penelitian yang Relevan

Dwi Berlianti (2013) dalam penelitiannya yang berjudul “Analisis Dosis di Organ Kritis Pada Terapi Glioblastoma dengan *Boron Neutron Capture Therapy* menggunakan Metode Simulasi MCNP5”. Dalam penelitiannya menggunakan dasar simulasi program MCNP5. Dengan mendefinisikan geometri dan komponen penyusun otak sebagai objek yang diteliti dan sumber radiasi yang digunakan, MCNP mampu mensimulasikan interaksi neutron yang terjadi di dalam otak. Keluaran yang didapatkan dari simulasi MCNP adalah fluks neutron, dosis hamburan neutron, dan dosis foton yang keluar dari kolimator. Fluks neutron keluaran MCNP inilah yang kemudian digunakan untuk menghitung dosis yang berasal dari interaksi neutron dengan material di jaringan. Dari hasil perhitungan konsentrasi boron didalam tumor yang paling baik adalah 25-35 $\mu\text{g/g}$ tumor dengan menggunakan arah penyinaran superior dan anteroposterior. Arah penyinaran lateral untuk kasus ini tidak dapat digunakan karena jarak sumber dengan jaringan tumor terlalu jauh. Dengan arah penyinaran dan konsentrasi yang sesuai tersebut dosis yang diterima kulit kurang dari 3Gy. Jarak sumber radiasi dengan tumor harus dibuat seminimal mungkin hal ini karena fluks neutron optimal pada kedalaman 2,4cm. Waktu iradiasi yang dibutuhkan adalah 3,5517 jam (10 μg Boron/g tumor); 3,1690 jam (15 μg Boron/g tumor); 2,8625 jam (20 μg Boron/g tumor); 2,60992 jam (25 μg Boron/g tumor); 2,40328 jam (30 μg Boron/g tumor); 2,403288 jam (35 μg Boron/g tumor).

F. Kerangka Berpikir

Berdasarkan hasil uraian di atas, akan dilakukan penelitian untuk simulasi terapi BNCT pada jaringan otak dengan menggunakan sumber neutron dari kolom termal pada Reaktor Kartini. Senyawa Boron yang akan di infus ke tubuh pasien adalah *Boron Phenylalanine* (BPA) dengan cara *intra vena*. Teknik *intra vena* yaitu misalnya pada kasus ini otak seorang pasien yang memiliki *Glioblastoma Multiform* akan di infus dengan BPA atau *Sodium Borocaptate* (BSH) melalui pembuluh darah vena. Selanjutnya dilakukan proses terapi BNCT dengan cara pasien yang sudah diinfus dengan BPA ditunggu 2-4 jam kemudian otak diiradiasi dengan Keluaran Kolimator Kolom Termal dalam waktu yang akan ditentukan dalam penelitian ini sehingga dosis yang akan diterima jaringan kanker bisa optimal.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2015 sampai bulan Desember 2016. Proses pembuatan kode berupa spesifikasi geometri otak dan material kanker otak dilaksanakan di Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) Yogyakarta.

B. Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah konsentrasi boron-10 yaitu 20 $\mu\text{gram/g}$ kanker, 25 $\mu\text{gram/g}$ kanker, 30 $\mu\text{gram/g}$ kanker dan 35 $\mu\text{gram/g}$ kanker.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai fluks neutron dan dosis hamburan neutron yang diterima jaringan kulit, *cranium*, *soft tissue*, *cerebrum*, ptv, ctv dan gtv (kanker).

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah desain kolimator, dimensi tumor dan jarak ujung kolimator ke permukaan kulit.

C. Alat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi fasilitas iradiasi untuk terapi BNCT. Alat dan bahan diuraikan sebagai berikut.

1. Perangkat keras berupa sebuah laptop dengan spesifikasi sebagai berikut.

Processor 1,8 GHz Pentium ULV, RAM 2 GB dan sistem operasi Windows 7 64 bit.

2. Perangkat lunak :

- a. Program simulasi menggunakan *Monte Carlo N Particle* (MCNP) versi X. program ini digunakan untuk mensimulasikan fenomena interaksi neutron terhadap geometri.
- b. *Visual Editor* (Vised) digunakan untuk mensimulasikan gambar bentuk kulit, *cranium*, *soft tissue*, *cerebrum*, PTV, CTV , kanker dan sumber radiasi serta data komposisi unsur penyusun.
- c. *Terminal Command Prompt* digunakan untuk menjalankan program MCNPX (*running*).

3. Data material dan dimensi geometri kanker

- a. Bentuk geometri kanker adalah bola dengan diameter 4 cm.
- b. Bentuk geometri jaringan otak adalah ellipsoid. Elipsoid adalah bola dengan jari-jari arah x, y dan z , jari-jari untuk arah x=10,12 cm, arah y=8,77 cm dan arah z=6,42 cm..

Pemodelan dilakukan dengan pendekatan bangun ellipsoid dan pendekatan pemodelan dilakukan berdasarkan Gambar 11. Persamaan yang digunakan untuk kulit kepala sebagai berikut.

$$\frac{(x)^2}{(10,12)^2} + \frac{(y - 160,644)^2}{(8,77)^2} + \frac{(z - 26,3)^2}{(6,42)^2} = 1 \quad (5)$$

Geometri jaringan kanker, *clinical tumor value* dan *planning tumor value* menggunakan geometri bola. Persamaan yang digunakan untuk kanker adalah sebagai berikut.

$$(x)^2 + (y - 160,644)^2 + (z - 26,3)^2 - 2^2 = 0 \quad (6)$$

Penjabaran lebih lengkap tentang persamaan (5) dan (6) dapat dilihat pada Lampiran 2. Data material jaringan kulit, *cranium*, *soft tissue*, *cerebrum*, ptv, ctv dan kanker dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Material untuk jaringan kulit

Unsur	Kode Material MCNPX	Fraksi Atom
H	1001	0,100588
C	6000	0,22825
N	7014	0,04642
O	8016	0,619002
Na	11023	0,00007
Mg	12000	0,00006
P	15031	0,00033
S	16032	0,00159
CL	17000	0,00267
K	19000	0,00085
Ca	20000	0,00015
Fe	26000	0,00001
Zn	30000	0,00001

Tabel 4. Material untuk *cranium*

Unsur	Kode Material MCNPX	Fraksi Atom
H	1001	0,034
C	6000	0,155
N	7014	0,042
O	8016	0,435
Na	11023	0,001
Mg	12000	0,002
P	15031	0,103
S	16032	0,003
Ca	20000	0,225

Tabel 5. Material untuk *soft tissue*

Unsur	Kode Material MCNPX	Fraksi Atom
H	1001	0,104472
C	6000	0,23219
N	7014	0,02488
O	8016	0,630238
Na	11023	0,00113
Mg	12000	0,00013
P	15031	0,00133
S	16032	0,00199
Cl	17000	0,00134
K	19000	0,00199
Ca	20000	0,00023
Fe	26000	0,00005
Zn	30000	0,00003

Tabel 6. Material untuk *cerebrum*

Unsur	Kode Material MCNPX	Fraksi Atom
H	1001	0,106999997
C	6012	0,144999995
N	7014	0,02199999
O	8016	0,71199997
P	15031	0,004

Tabel 7. Material untuk *Planning Tumor Volume* (PTV)

Unsur	Kode Material MCNPX	Fraksi Atom
H	1001	0,106999997
C	6012	0,144999995
N	7014	0,02199999
O	8016	0,71199997
Na	11023	0,002
P	15031	0,004
S	16032	0,002
Cl	17000	0,003
K	19000	0,003

Tabel 8. Material untuk *Clinical Tumor Volume* (CTV)

Unsur	Kode Material MCNPX	Fraksi Atom
H	1001	0,106999997
C	6012	0,144999995
N	7014	0,02199999
O	8016	0,71199997
Na	11023	0,002
P	15031	0,004
S	16032	0,002
Cl	17000	0,003
K	19000	0,003

Tabel 9. Material untuk *Gross Tumor Volume* (GTV)

Unsur	Kode Material MCNPX	Fraksi Atom
H	1001	0,09899901
C	6012	0,26899731
N	7014	0,0449995
O	8016	0,56899431
P	15031	0,0179998

c. *Tally*

Tally menunjukkan informasi yang ingin dikumpulkan oleh pengguna. MCNP mampu menghitung berbagai informasi arus, fluks permukaan, fluks rata-rata sel, fluks pada titik tertentu di detektor. Jenis-jenis *tally* yang disediakan terdapat pada Tabel 10.

Tabel 10. Format *Tally* pada MCNP.

Kode	Jenis <i>Card</i>
Fna	<i>Tally</i>
FCn	Komentar pada <i>Tally</i>
En	Energi <i>Tally</i>
Tn	Waktu <i>Tally</i>
Cn	Cosinus
FQn	Hirarki Cetakan
FMn	<i>Tally</i> Multiplier
DEn/DFn	Dosis Energi/ Fungsi Dosis
EMn	Energi Multiplier
TMn	Waktu Multiplier
CMn	Cosinus Multiplier

Sumber : (Shwarz et al 2008)

Contoh penggunaan *tally* diperlihatkan pada Tabel 10. *Tally* yang digunakan minimal satu dalam suatu *code* MCNP agar perangkat lunak mengerti perintah dihasilkannya suatu keluaran sesuai keinginan pengguna.

Tabel 11. *Tally* pada MCNP.

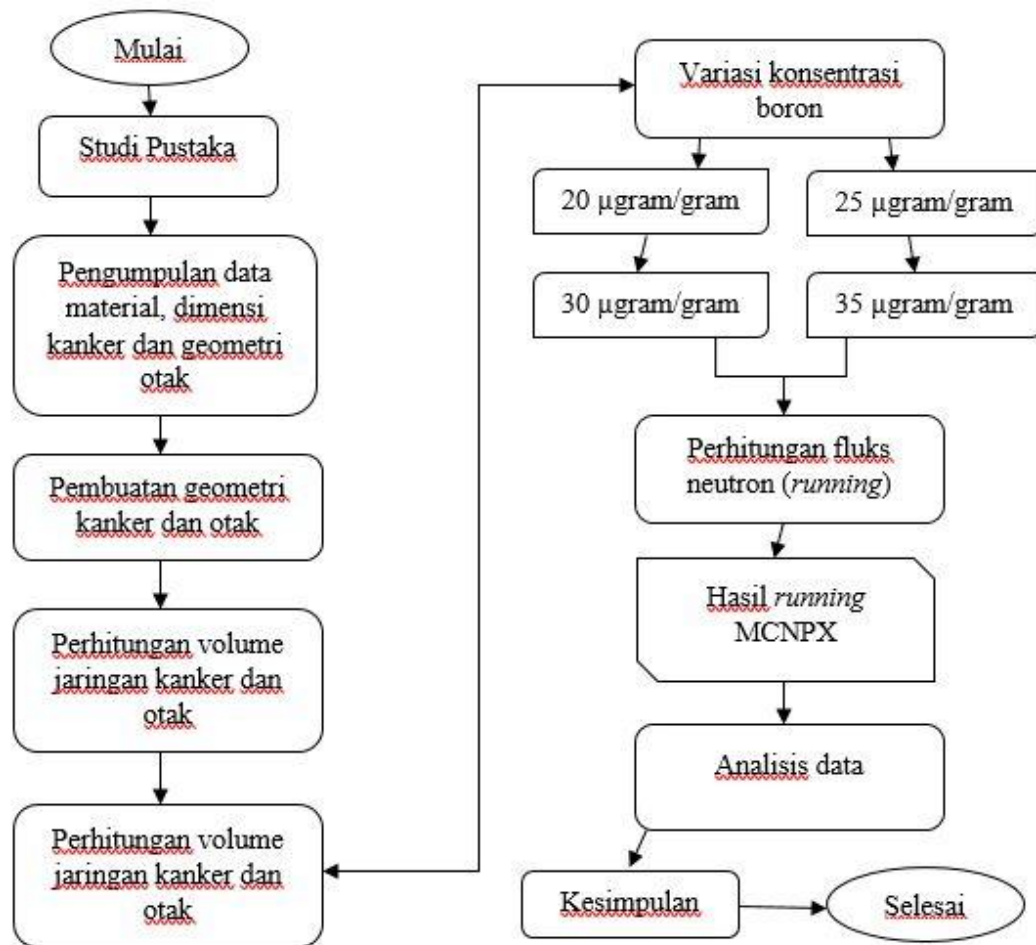
<i>Tally</i>	Penjelasan
F1:N, F1:P, F1:E	Arus partikel di permukaan
F2:N, F2:P, F2:E	Fluks di permukaan
F4:N, F4:P, F4:E	Panjang jejak yang diperkirakan di dalam fluks sel
F5a:N, F5a:P	Fluks pada suatu titik atau detektor berbentuk cincin
F6:N, F6:P, F6:N,P	Panjang jejak yang diestimasi dari deposisi energi
F7:N	Panjang jejak yang diestimasi dari deposisi energi
F8:N, F8:P, F8:E, F8:P,E	Tally Tinggi Pulsa

Sumber : (Booth *et al*,2008)

Berdasarkan Tabel 11, MCNP memberikan tujuh standar jenis *tally*. Standar ini termasuk dalam tujuh *tally* neutron, enam *tally* foton dan empat *tally* elektron.

D. Alur Penelitian

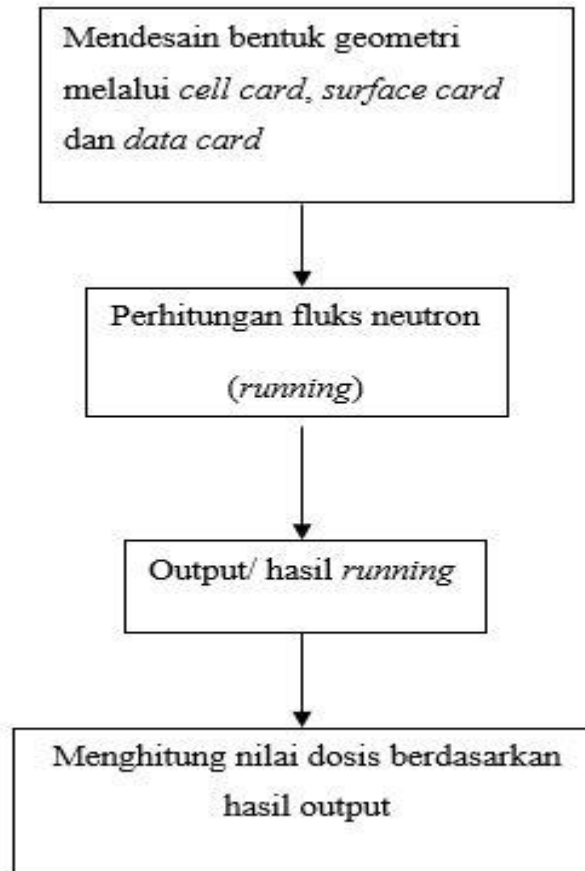
Perumusan prosedur pelaksanaan penelitian digambarkan dalam diagram alir (*flow chart*) yang ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 6. Alur Penelitian

E. Alogaritma MCNPX

Alogaritma komputasi menggunakan MCNPX



Gambar 7 . Alogaritma MCNPX

1. *Input MCNPX*

Pembuatan *input* dilakukan pada notepad++ dan kemudian disimpan dengan file ekstensi *.i. *Input* dalam notepad++ berisi *cell card*, *surface card* yang masing-masing dibatasi oleh *blank delimiter*. Macam-macam *input* pada MCNPX dijelaskan sebagai berikut.

a. *Cell Card*

Adalah bagian yang memuat unit volume yang telah dirangkai dari *surface card* dan diisi oleh material dari *data card*.

Tabel 12. Parameter *Input*

Parameter input	Deskripsi
Nomor <i>cell</i> (j)	$1 \leq j \leq 99999$
Nomor material (m)	Jika $m > 0$, maka cell berisi material m Jika $m < 0$, maka cell dianggap ruang hampa
Densitas material (d)	Jika $d > 0$, maka yang dimaksud adalah densitas atom dengan satuan $10^{24} \text{ atom.cm}^{-3}$ Jika $d < 0$, maka yang dimaksud adalah densitas massa dengan satuan g.cm^{-3}
Geom	Spesifikasi geometri <i>cell</i>
Param	Spesifikasi opsional dari parameter <i>cell</i>

b. *Surface Card*

Surface Card adalah batas-batas geometri standar yang merupakan ekspresi dari persamaan matematika. Sebagai contoh suatu bidang batas datar (*plane*) adalah ekspresi dari persamaan linier, sedangkan bidang batas silinder adalah ekspresi dari persamaan matematika untuk lingkaran. Secara lengkap batas-batas geometri ditunjukkan dalam Tabel 13.

Tabel 13. Batas Geometri

Lambang	Tipe	Keterangan	Persamaan	Input
PX	Plat	Tegak lurus sumbu x	$x - D = 0$	D
CX	Silinder	Pada sumbu x	$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
KX	Kerucut	Pada sumbu x	$\sqrt{y^2 + z^2} - t(x - \bar{x})^2 = 0$	$\bar{x} - t^2 \pm 1$
SQ	Elipsoid	Titik pusat pada sumbu x	$A(x - \bar{x})^2 + B(y - \bar{y})^2 + C(z - \bar{z})^2 + 2D(x - \bar{x})(y - \bar{y}) + 2E(x - \bar{x})(z - \bar{z}) + 2F(y - \bar{y})(z - \bar{z}) + G = 0$	$A B C D E$ $F G \bar{x} \bar{y} \bar{z}$
SX	Bola	Titik pusat pada sumbu x	$(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} R$

c. Data Card

Data card berisi informasi terkait unit volume, bisa berupa unsur penyusun unit volume, sumber radiasi, data titik interpolasi untuk dosis radiasi, mode pengukuran, energi dan jumlah iterasi yang ingin dilakukan terkait kebutuhan akurasi.

Dalam MCNP pendefinisian unsur kimia disebut *Zaid*, yaitu identitas (*id*) unsur yang diwakili oleh nomor atom (Z) dan nomor massa (A). karena suatu material bisa tersusun atas lebih dari satu unsur, maka penulisannya adalah *Zaid* diikuti fraksi atom atau massa dalam senyawa atau campuran itu. Pada *data card* juga terdapat input untuk melakukan pengukuran neutron gamma.

F. Running MCNPX

Deretan perintah yang membentuk program *source code* disimpan dalam *notepad++* dengan format *.i file. *Running* *.i file dieksekusi melalui *command prompt* (cmd) dengan cara memanggil *directory file source code* tersimpan. Contoh proses *running* untuk konsentrasi 35µgram/gram :

```

mcnpix i=c35.i o=c35.o
E:\akurangan\35>mcnpix i=c35.i o=c35.o
mcnpix ver=2.6.0 id=Wed Apr 09 08:00:00 MSI 2008 04/17/17 09:38:45
*****
* MCNPX
* Copyright 2007, Los Alamos National Security, LLC.
* All rights reserved.
* This material was produced under U.S. Government contract
* DE-AC52-06NA25396 for Los Alamos National Laboratory,
* which is operated by Los Alamos National Security, LLC
* for the U.S. Department of Energy. The Government is
* granted for itself and others acting on its behalf a
* paid-up, nonexclusive, irrevocable worldwide license in
* this material to reproduce, prepare derivative works, and
* works, and perform publicly and display publicly.
* Beginning five (5) years after June 1, 2006, subject to
* additional five-year worldwide renewals, the Government
* is granted for itself and others acting on its behalf
* a paid-up, nonexclusive, irrevocable worldwide license
* in this material to reproduce, prepare derivative works,
* distribute copies to the public, perform publicly and
* display publicly, and to permit others to do so.
*
* NEITHER THE UNITED STATES NOR THE UNITED STATES
* DEPARTMENT OF ENERGY, NOR LOS ALAMOS NATIONAL SECURITY,
* LLC, NOR ANY OF THEIR EMPLOYEES, MAKES ANY WARRANTY,
* EXPRESS OR IMPLIED, OR ASSUMES ANY LEGAL LIABILITY OR
* RESPONSIBILITY FOR THE ACCURACY, COMPLETENESS, OR
* USEFULNESS OF ANY INFORMATION, APPARATUS, PRODUCT, OR
* PROCESS DISCLOSED, OR REPRESENTS THAT ITS USE WOULD NOT
* INFRINGE PRIVATELY OWNED RIGHTS.
*****
mode n p
warning. photonuclear physics may be needed <phys:p>.
warning. total nu is now the default for fixed-source problems.
warning. 8 materials had unnormalized fractions. print table 40.
imcn is done
runtpe already exists. runtpe is created instead.
runtpf already exists. runtpe is created instead.
runtpg already exists. runtph is created instead.
runtph already exists. runtpe is created instead.
runtpi already exists. runtpe is created instead.
runtpj already exists. runtpe is created instead.
runtpk already exists. runtpe is created instead.
runtpl already exists. runtpe is created instead.
warning. neutron energy cutoff is below some cross-section tables.
warning. 2 cross sections modified by free gas thermal treatment.
warning. material 1 has been set to a conductor.
warning. material 2 has been set to a conductor.
warning. electron oscillator fitting convergence problem.
warning. material 12 has been set to a conductor.

```

Gambar 8. Tampilan Windows Command Prompt.

1. Output MCNPX

Output MCNPX secara otomatis tersimpan satu folder dengan file *input*. Format file dalam bentuk ekstensi *.o dan dapat dibuka dengan *notepad*. *Output* ini berisi data hasil perhitungan. Contoh file output untuk konsentrasi 35µg/gram :

```

651 tally 4 nps = 1000000
652 tally type 4 track length estimate of particle flux.
653 particle(s): neutron
654
655 this tally is all multiplied by 6.47948E+14
656
657 volumes
658 cell: 5 8 9 10 11 12
659 1.16646E+05 4.67554E+02 4.22889E+02 3.56140E+02 6.05998E+01 2.19976E+0
660 cell: 14 17 18 19 20 21
661 2.67947E+02 6.05998E+01 1.51499E+01 1.51499E+01 1.51499E+01 1.51499E+0
662 cell: 24 25 26 27 28 29
663 7.54971E+00 1.51499E+01 1.51499E+01 1.51499E+01 1.51499E+01 1.51499E+0
664 cell: 31 32 33
665 1.51499E+01 6.05998E+01 6.05998E+01
666
667 cell 5
668 energy
669 5.0000E-07 7.62440E+06 0.1054
670 1.0000E-02 1.79668E+08 0.0297
671 2.0000E+01 2.32213E+06 0.2874
672 total 1.89615E+08 0.0289
673
674 cell 8
675 energy
676 5.0000E-07 1.91204E+08 0.0931
677 1.0000E-02 1.88778E+08 0.0607
678 2.0000E+01 1.58566E+06 0.4764

```

Gambar 9. Tampilan *Output*/ Hasil *Running*

G. Metode Perhitungan Dosis Radiasi

Perhitungan dosis dari BNCT terdiri dari empat bagian sesuai dengan interaksi yang terjadi. Komponen dosis diantaranya dosis alfa, dosis gamma dari reaktor dan interaksi dengan materi, dosis proton dan dosis hamburan neutron. Keluaran MCNP yang dapat digunakan langsung adalah penentuan nilai laju dosis gamma dari reaktor dan dosis hamburan neutron. Dilanjutkan dengan melakukan perhitungan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel* sesuai dengan langkah-langkah pada subbab ini.

1. Perhitungan nilai konsentrasi Boron-10 , misal pada dosis 20 µg/g tumor

a. Tumor (*Gross Tumor Volume*)

$$\begin{aligned}
 V &= 267,947 \text{ cm}^3 \\
 r &= 1,04 \text{ g/cm}^3 \\
 m_{\text{tumor}} &= V \times r \\
 &= 267,947 \times 1,04 \\
 &= 68,067840831 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$m_{\text{Boron-10}} = 20 \text{ mg} \times 10^{-6} \text{ g/mg} \times 68,067840831 \text{ g} = 1,361357 \times 10^{-3} \text{ g}$$

2. Perhitungan laju dosis

Laju dosis dari komponen yang akan dihitung secara manual memiliki perbedaan persamaan yang digunakan. Perhitungan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

a. Dosis dari reaksi neutron termal dengan Hidrogen-1

Reaksi neutron termal dengan Hidrogen-1 mengikuti persamaan (2). Pada persamaan (2), dihasilkan gamma berenergi 2.23 MeV. Perhitungan laju pembentukan Deuterium yang terbentuk dilakukan karena laju pembentukan gamma pada reaksi ini sama dengan laju pembentukan Deuterium. Laju pembentukan gamma dihitung mengikuti persamaan (7).

$$\ddot{R} = \Phi \cdot N_{H-jaringan} \cdot \sigma_H \quad (7)$$

dengan:

\ddot{R} : laju pembentukan Hidrogen-2 atau laju pelepasan gamma
(foton/kg.s = Bq/ kg)

Φ : fluks neutron termal (neutron.cm⁻².detik⁻¹)

$N_{H-jaringan}$: jumlah atom hidrogen per kg jaringan (atom / kg)

σ_H : tampang lintang serapan neutron termal terhadap hidrogen (cm²)

Fraksi dosis serap gamma merupakan koefisien yang menunjukkan dosis yang diterima jaringan dari energi radiasi gamma tertentu. Penentuan dosis gamma di jaringan ditentukan dengan persamaan (8) (Herman Chember et al, 2009).

$$\dot{D}_\gamma = \ddot{R} \Delta \varphi \quad (8)$$

dengan :

\ddot{R} : laju pembentukan Hidrogen-2 atau laju pelepasan gamma
(foton/kg.s = Bq/ kg)

Δ : koefisien laju dosis serap atau aktivitas spesifik
: $(1,6 \times 10^{-13} \times 2,33 \text{ MeV}/\gamma = 3,568 \times 10^{-13} \frac{\text{Gy/s}}{\text{Bq/kg}})$

φ : fraksi dosis serap gamma (ditentukan dengan melihat lampiran 4)

b. Laju dosis proton reaksi Nitrogen

Perhitungan dosis proton dihasilkan oleh reaksi pada persamaan (3). Pada reaksi ini dihasilkan diantaranya proton dengan energi (Q) 0,66 MeV. Perhitungan laju dosis dilakukan dengan menggunakan persamaan (9).

$$\dot{D}_{proton} = \frac{\Phi N_{N-jaringan} \sigma_{a,N} \times Q \ 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}} \quad (9)$$

keterangan :

\dot{D}_{proton} : laju dosis proton (Gy/s)

Φ : fluks neutron termal (neutron.cm⁻².detik⁻¹)

$N_{N-jaringan}$: jumlah atom nitrogen per kg jaringan (atom/kg jaringan)

$\sigma_{a,N}$:ampang lintang mikroskopik serapan Nitrogen (cm²)

Q : energi partikel (MeV)

c. Laju dosis alfa hasil interaksi Boron dengan neutron termal

Perhitungan dosis alfa dihasilkan oleh reaksi pada persamaan (1). Pada reaksi ini dihasilkan diantaranya alfa dengan energi rerata (Q) 2,33 MeV. Perhitungan laju dosis dilakukan dengan menggunakan persamaan (10).

$$\dot{D}_{alfa} = \frac{\Phi N_{B-10-jaringan} \sigma_{a,B-10} Q \times 1,6 \times 10^{-13} J/MeV}{1 \frac{J/kg}{Gy}} \quad (10)$$

keterangan :

\dot{D}_{alfa} : laju dosis alfa (Gy/detik)

Φ : fluks neutron termal (neutron.cm⁻².detik⁻¹)

$N_{B10-jaringan}$: jumlah atom Boron per kg jaringan (atom/kg jaringan)

$\sigma_{a,B-10}$: tampang lintang mikroskopik serapan Boron 10 (cm²)

Q : energi partikel (MeV)

d. Laju dosis total

Dosis total pada penelitian ini memiliki prinsip yang sama dengan dosis ekuivalen pada proteksi radiasi. Dosis ekuivalen merupakan sebaran dosis yang khusus digunakan dalam proteksi radiasi dan menyatakan besarnya tingkat kerusakan pada jaringan tubuh akibat terserapnya sejumlah energi radiasi dengan memperhatikan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Dosis ekuivalen didapatkan dengan mengalikan dosis serap dengan faktor bobot radiasi.

Dosis total dari masing-masing radiasi memiliki kontribusi yang berbeda diantaranya karena faktor *Relative Biological Effectiveness* (RBE), *Compound Biological Effectiveness* (CBE) dan *Dose Reduction Factor* (DRF). Penentuan nilai faktor kualitas radiasi pada BNCT setelah mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi efek biologis. Efek biologis memiliki perbedaan akibat sifat suatu jaringan terhadap materi berbeda (radio sensitif, radio resisten dan radio responsif). Faktor kualitas radiasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

Tabel 14. Faktor kualitas radiasi.

Sumber radiasi	Faktor bobot radiasi
Alfa	3,8 (tumor) 1,3 (jaringan sehat)
Proton	3,2
Neutron hamburan	3,2
Gamma	1

Sumber: (Mika Kortensniemi, 2002).

Persamaan yang dilakukan untuk perhitungan dosis total dari dosimetri BNCT mengikuti persamaan (11).

$$\dot{D}_{total} = (w_{Alfa} \times \dot{D}_{Alfa}) + (w_p \times \dot{D}_{proton}) + (w_n \times \dot{D}_{neutron}) + (w_\gamma \times \dot{D}_\gamma) \quad (11)$$

keterangan :

w_{Alfa} : faktor kualitas radiasi dari alfa

w_p : faktor kualitas radiasi dari proton

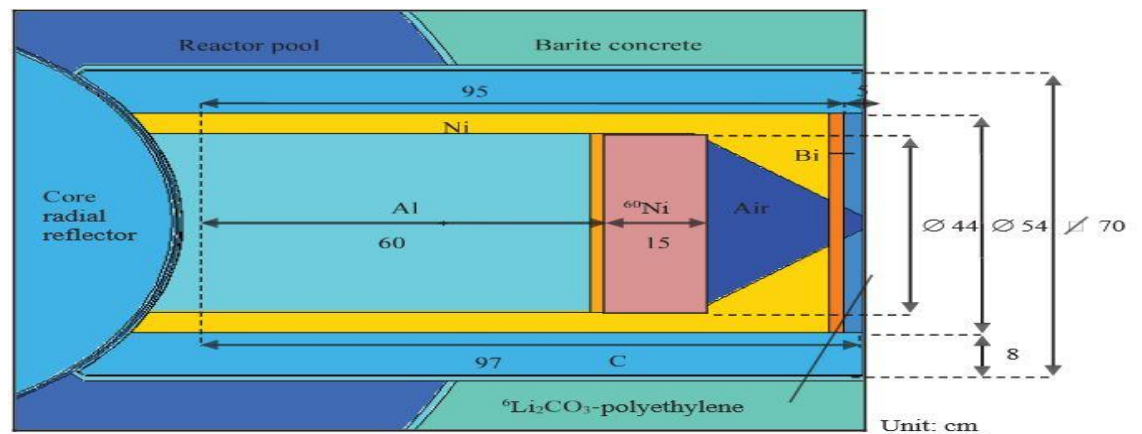
w_n : faktor kualitas radiasi hamburan neutron

w_γ : faktor kualitas radiasi gamma

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Sumber neutron yang digunakan merupakan hasil keluaran model kolimator buatan Nina Fauziah (2013). Desain Kolimator yang digunakan dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Model Kolimator Kolom Termal Reaktor Kartini (Nina Fauziah, 2013).

Kolimator ini tersusun dari material-material sebagai berikut.

1. Dinding kolimator *Ni* dengan ketebalan 5 cm,
2. Moderator *Al* dengan ketebalan 60 cm,
3. Penyaring neutron cepat ^{60}Ni dengan ketebalan 15cm
4. Perisai sinar gamma *Bi* dengan ketebalan 2 cm,
5. $^6\text{Li CO}_2\text{-polyethylene}$ dengan ketebalan 3 cm.

Sumber neutron berasal dari Reaktor Kartini setelah melewati kolimator yang telah didesain secara konseptual. Kriteria dari neutron yang keluar dari kolimator kolom termal ditunjukkan dalam Tabel 15 (IAEA, 2001).

Tabel 15. Kriteria Neutron Keluaran Kolimator Kolom Termal

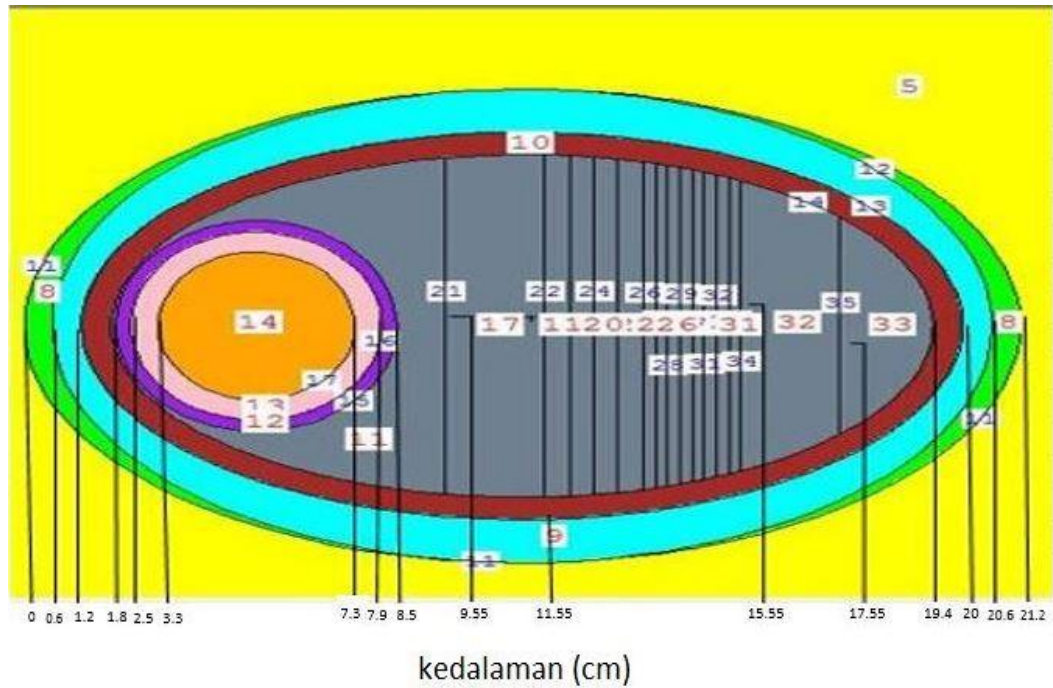
Parameter	Nilai
$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$1,65 \times 10^9$
$\dot{D}_f / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$1,59 \times 10^{-13}$
$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$1,16 \times 10^{-13}$
ϕ_{th}/ϕ_{epi}	0,007
J/ϕ_{epi}	0,72

Standar keluaran neutron dari kolimator digunakan untuk memastikan kualitas dari desain yang telah dibuat dengan besar parameter-parameter ditunjukkan dalam Tabel 16 (IAEA, 2001).

Tabel 16. Standar IAEA

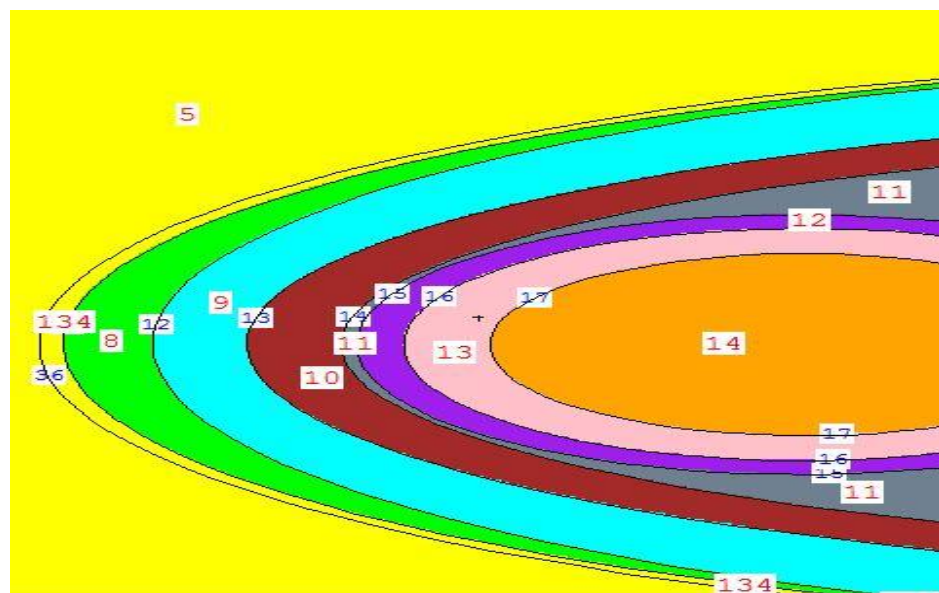
Parameter	Notasi (satuan)	Rekomendasi IAEA
Fluks neutron epitermal	$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$> 1,0 \times 10^9$
Rasio laju dosis neutron cepat dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_f / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio laju dosis gamma dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio antara fluks termal dan epitermal	ϕ_{th}/ϕ_{epi}	$< 0,05$
Rasio antara arus neutron dan fluks neutron	J/ϕ_{epi}	$< 0,7$

Hasil keluaran fluks neutron epitermal dalam penelitian ini sudah memenuhi standar IAEA. Bentuk geometri untuk otak dan kanker yang dijadikan simulasi dalam pengobatan kanker otak dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 12. Rentang kedalaman

Pada gambar 12 lapisan kulit mempunyai ketebalan 0,6 cm, cranium 0,6 cm, soft tissue 0,6 cm kemudian *planning tumor volume* 0,5 cm, *clinical tumor volume* 0,5 cm, *gross tumor volume* (kanker) dengan diameter 4 cm.



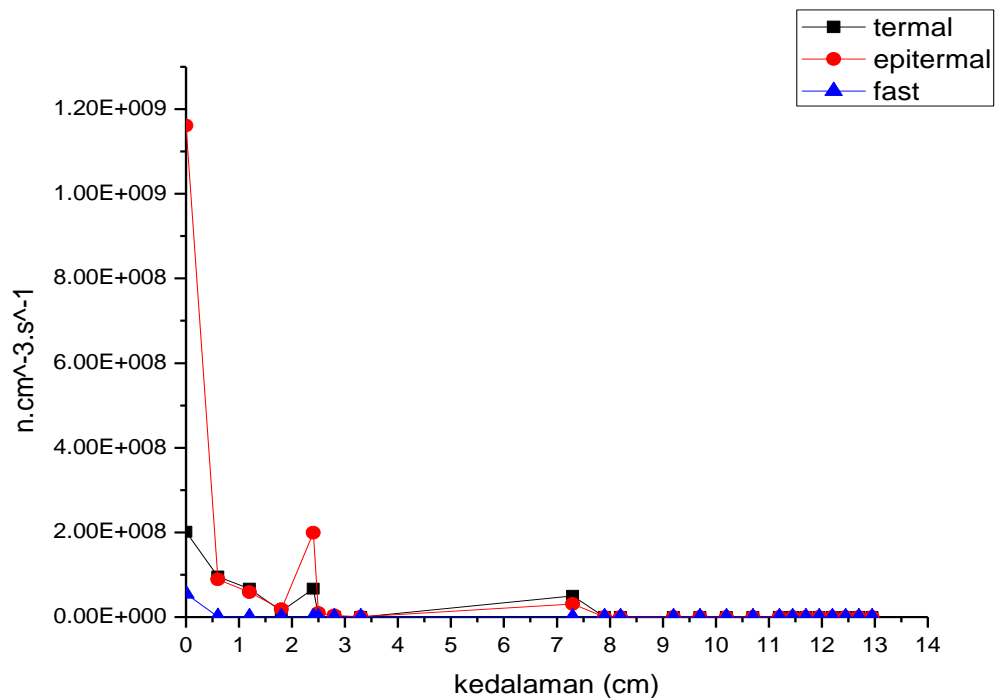
Gambar 13. Penambahan *cell* 134

Pada Gambar 13 terdapat penambahan *cell* baru yaitu *cell* 134 dengan ketebalan 0,1 cm. Hal itu bertujuan untuk mengetahui besar fluks neutron sebelum memasuki kulit atau pada kedalaman 0 cm. Hasil keluaran simulasi ini berupa besaran fluks neutron, dosis hamburan neutron dan dosis gamma yang dihasilkan oleh sumber radiasi. Besarnya nilai fluks neutron rata-rata yang diterima setiap *cell* jaringan sangat berpengaruh terhadap nilai dosis yang diterima oleh tiap jaringan. Tabel 17 menunjukkan nilai fluks yang diterima oleh tiap jaringan.

Tabel 17. Hasil keluaran kolimator kolom termal

<i>Cell</i>	Nama Jaringan	Fluks Termal ($n.cm^{-3}.s^{-1}$)	Fluks Epiermal ($n.cm^{-3}.s^{-1}$)	Fluks Neutron Cepat ($n.cm^{-3}.s^{-1}$)
134	sebelum kulit	2.011E+08	1.161E+09	5.53E+07
8	kulit kepala	9.557E+07	8.909E+07	5.10E+05
9	<i>cranium</i>	6.670E+07	5.854E+07	0.00E+00
10	<i>soft tissue</i>	1.386E+07	1.808E+07	0.00E+00
11	<i>cerebrum</i>	6.652E+07	1.993E+08	0.00E+00
12	PTV	2.303E+06	9.511E+06	0.00E+00
13	CTV	6.217E+05	3.848E+06	0.00E+00
14	GTV	1.374E+05	7.265E+05	0.00E+00
17	slice	5.021E+07	3.094E+07	0.00E+00
18	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
19	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
20	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
21	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
24	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
25	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
26	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
27	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
28	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
29	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
30	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
31	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
32	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00
33	slice	0.000E+00	0.000E+00	0.00E+00

Tabel 17 adalah tabel nilai fluks dengan konsentrasi boron 35 $\mu\text{gram/gram}$, sedangkan untuk dosis lainnya (20 $\mu\text{gram/gram}$, 25 $\mu\text{gram/gram}$ dan 30 $\mu\text{gram/gram}$) memiliki nilai yang hampir sama dengan Tabel 17 . Karakteristik nilai fluks yang diterima oleh jaringan dapat dilihat pada grafik hubungan nilai fluks dengan kedalaman jaringan yang ditampilkan pada Gambar 14.



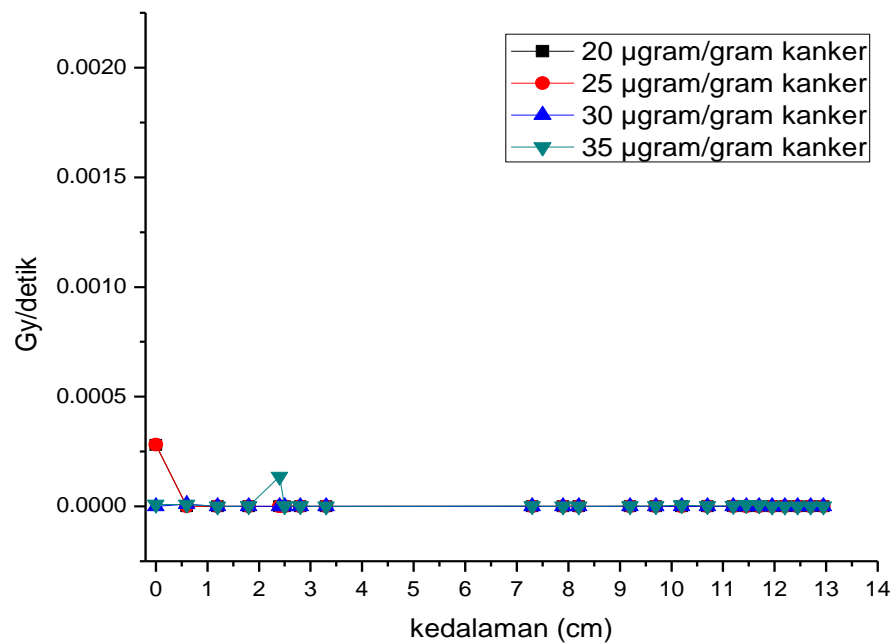
Gambar 14. Grafik hubungan antara fluks dan kedalaman.

Dilihat dari Gambar 14 terdapat tiga nilai fluks yaitu fluks termal, fluks epitermal dan fluks neutron cepat. Saat dimasukkan konsentrasi boron 35 $\mu\text{gram/gram}$ fluks epitermal berada pada puncak pada kedalaman 0 cm atau sebelum menyentuh kulit yaitu $1,61\text{E}+9 \text{ n.cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$.

Hal itu berbeda dengan fluks termal yang nilainya lebih rendah yaitu $2,01\text{E}+08 \text{ n.cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$. Sementara untuk neutron cepat cenderung rendah dengan nilai menuju nol secara konsisten. Nilai fluks epitermal mengecil sedangkan nilai fluks termal

cenderung stabil dikarenakan moderasi fluks epitermal. Moderasi adalah penurunan tingkat energi neutron dan yang menjadi media moderasi adalah tubuh manusia.

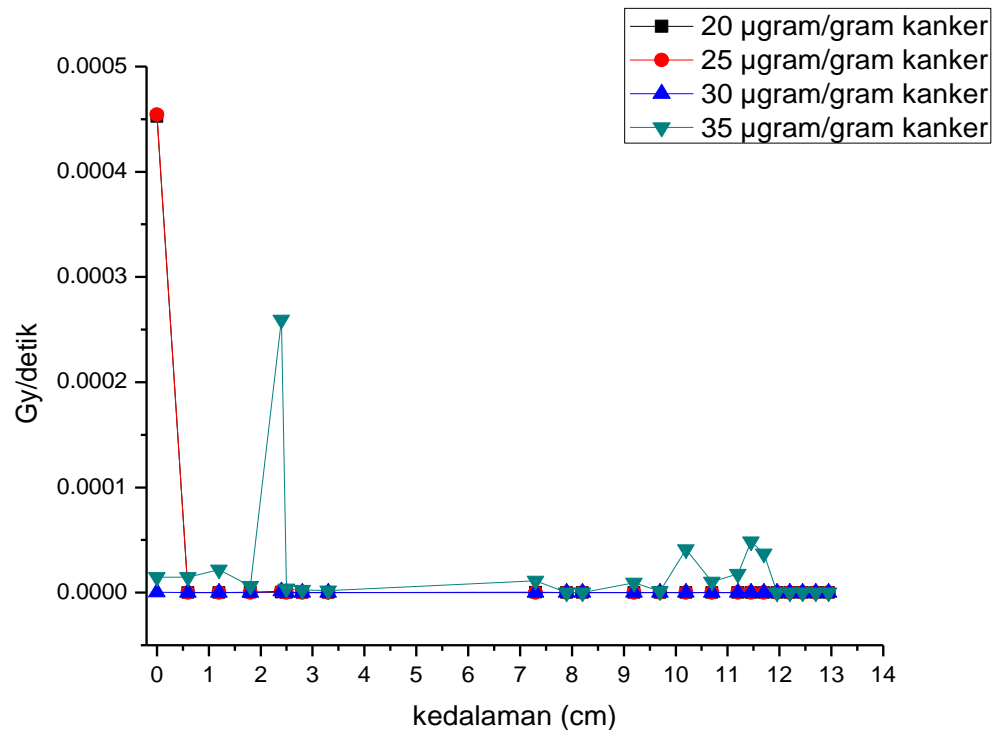
Neutron termal ketika termoderasi energinya turun ke tingkat neutron termal. Dengan hasil nilai fluks yang didapat jaringan akan berpengaruh dengan dosis serap total yang diterima oleh jaringan tubuh. Dosis hamburan neutron yang berasal dari neutron termal, epitermal dan cepat akan dihitung oleh MCNPX dengan memasukkan nilai energi dengan simbol de (pada lampiran 1) dan nilai faktor konversi energi ke dosis dengan simbol df (pada lampiran 1). Output dari perhitungan ini berupa laju dosis serap dengan satuan Gy/detik.



Gambar 15. Dosis gamma

Gambar 15 menunjukkan besarnya dosis gamma reaksi dengan nilai yang didapat dari perhitungan pada lampiran 3 dengan Tabel pada lampiran 5. Grafik di atas merupakan perbandingan antara konsentrasi konsentrasi boron 20 µgram/g, 25 µgram/g, 30 µgram/g dan 35 µgram/g. Pada konsentrasi 25 µgram/gram nilai dosis

gamma berada pada puncak yaitu $2,807\text{E-}04$ Gy/detik, selanjutnya untuk konsentrasi $35\text{ }\mu\text{gram/g}$ berasa pada puncak dengan nilai $1,35\text{E-}8$ Gy/detik. Sedangkan untuk konsentrasi yang lain nilainya cenderung stabil dan konsisten menuju nol.

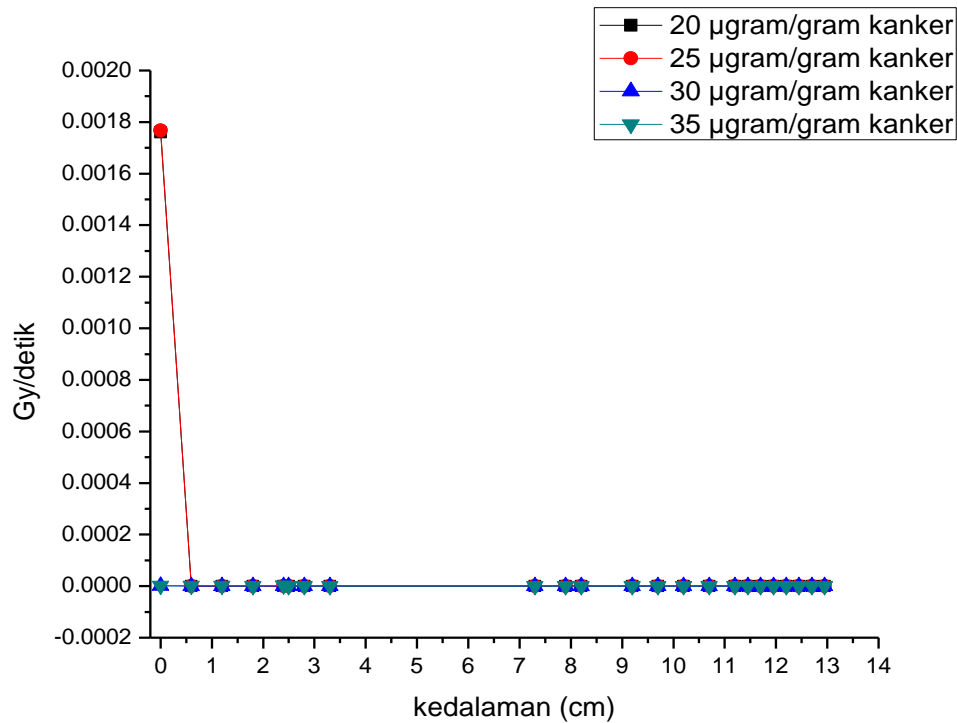


Gambar 16. Dosis nitrogen

Gambar 16 menunjukkan besarnya dosis nitrogen dengan nilai yang didapat dari perhitungan pada lampiran 3 dengan tabel pada lampiran 6 . Grafik diatas merupakan perbandingan antara konsentrasi konsentrasi boron $20\text{ }\mu\text{gram/gram}$, $25\text{ }\mu\text{gram/gram}$, $30\text{ }\mu\text{gram/gram}$ dan $35\text{ }\mu\text{gram/gram}$.

Pada konsentrasi $25\text{ }\mu\text{gram/gram}$ nilai dosis nitrogen berada pada puncak yaitu $4,54\text{E-}04$ Gy/detik, lalu turun dengan nilai paling rendah adalah $7,9\text{E-}09$ Gy/detik. Untuk konsentrasi $35\text{ }\mu\text{gram/gram}$ nilai dosisnya naik pada kedalaman $2,4\text{ cm}$ yaitu

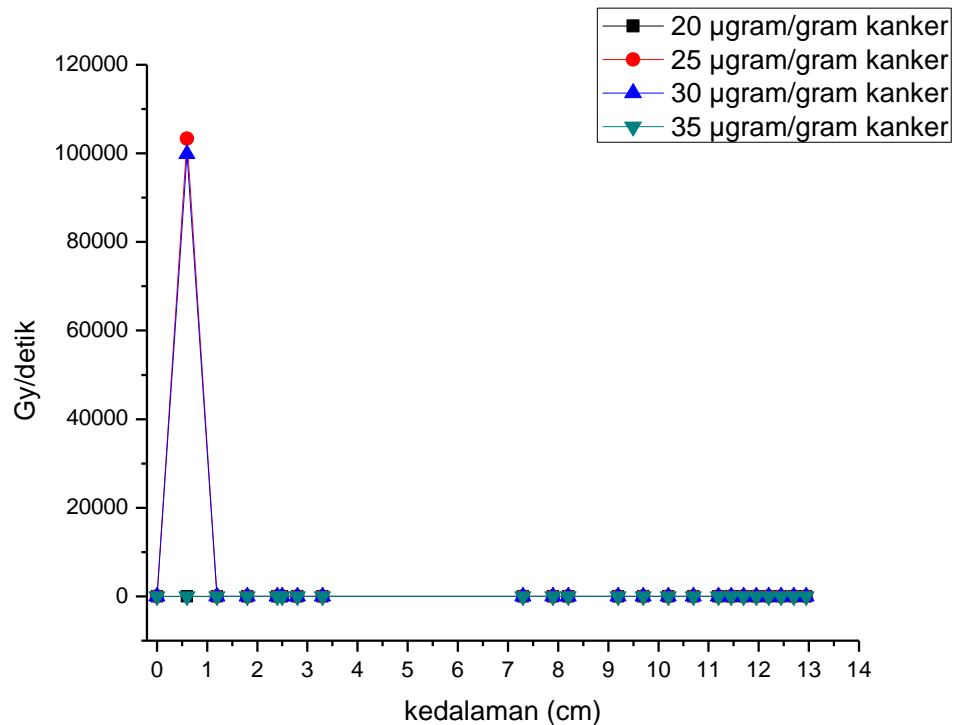
2,59E-04 Gy/detik untuk konsentrasi 20 $\mu\text{gram/gram}$ dan 30 $\mu\text{gram/gram}$ nilainya cenderung stabil dan konsisten menuju nol.



Gambar 17. Dosis boron

Gambar 17 menunjukkan besarnya dosis boron dengan nilai yang didapat dari perhitungan pada lampiran 3 dengan tabel pada lampiran 7. Grafik di atas merupakan perbandingan antara konsentrasi konsentrasi boron 20 $\mu\text{gram/gram}$, 25 $\mu\text{gram/gram}$, 30 $\mu\text{gram/gram}$ dan 35 $\mu\text{gram/gram}$.

Pada konsentrasi 25 $\mu\text{gram/gram}$ nilai dosis boron berada pada puncak yaitu 1,77E-03 Gy/detik lalu menurun konsisten menuju nol. Sedangkan untuk konsentrasi yang lain nilainya cenderung sama dan konsisten pada nilai mendekati nol.



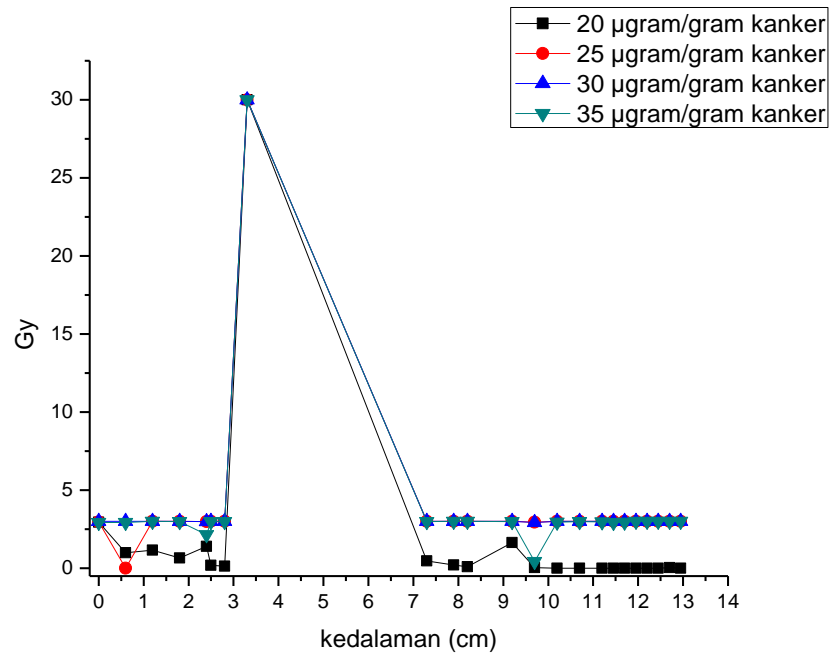
Gambar 18. Dosis total

Gambar 18 menunjukkan besarnya dosis total dengan nilai yang didapat dari perhitungan pada lampiran 3 dengan tabel pada lampiran 9. Grafik diatas merupakan perbandingan antara konsentrasi konsentrasi boron 20 µgram/gram, 25 µgram/gram, 30 µgram/gram dan 35 µgram/gram.

Pada konsentrasi 25 µgram/gram nilai dosis total berada pada puncak yaitu 9,464E-03 Gy/detik dan 25 µgram/gram dengan nilai 1,01E-03 Gy/detik kemudian turun dan konsisten dengan nilai mendekati nol. Sedangkan untuk konsentrasi yang lain nilainya cenderung dan stabil pada nilai mendekati nol. Pada metode pengobatan BNCT, dosis digunakan secara fraksi tunggal. Fraksi tunggal adalah pemberian dosis secara langsung dalam satu kali iradiasi sehingga perlu diperhatikan dosis total yang diterima oleh sel sehat. Untuk menentukan apakah dosis yang diserap oleh jaringan tubuh aman atau tidak, digunakan besaran dosis serap total (Dwi Berlianti, 2013).

$$\text{Dosis serap total} = \text{laju dosis (Gy/detik)} \times \text{waktu iradiasi (detik)} \quad (12)$$

$$\text{Waktu iradiasi} = \frac{\text{dosis minimal perusak jaringan kanker}}{\text{laju dosis total}} \quad (13)$$



Gambar 19. Dosis Serap Total

Pada lampiran 11 didapat grafik dosis serap total. Dosis serap total merupakan hasil perkalian besaran laju dosis dengan waktu iradiasi dimana waktu iradiasi didapat dari hasil dosis minimal perusak jaringan kanker (dalam Gy). Batas dosis minimal yang digunakan dalam simulasi ini adalah 30 Gy. Waktu iradiasi dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18. Dosis Total dan waktu iradiasi pada jaringan kanker.

Konsentrasi boron	Dosis Total (Gy/detik)	Waktu iradiasi untuk 30 Gy (detik)	Waktu iradiasi untuk 30 Gy (menit)
20 µg/gram kanker	0.000299	10029,48	167,16
25 µg/gram kanker	0.0003	10000,39	166,67
30 µg/gram kanker	0.000301	9956,24	165,94
35 µg/gram kanker	0.000298	10071,26	167,85

Dari Tabel 19 dapat diketahui waktu iradiasi yang dibutuhkan untuk terapi kanker. Pada konsentrasi boron 30 µg/gram kanker waktu yang dibutuhkan relatif singkat.

Dengan diketahui nilai dosis serap yang diterima oleh jaringan, maka dapat diperkirakan efek yang diterima oleh jaringan dengan membandingkan nilai batas dosis tiap jaringan. Efek yang dapat diketahui berdasarkan nilai dosis serap yang diterima adalah efek deterministik. Efek deterministik adalah efek radiasi yang langsung dirasakan oleh pasien.

Tabel 19. Efek deterministik pada kulit (Bapeten, 2015)

Efek radiasi	Rentang dosis (Gy)	Waktu
Eritema awal	2-3	6-24 jam
Epilasi dan deskuamasi kering	3-12	3-6 minggu
Deskuamasi basah	12-20	4-6 minggu
Nekrosi	>20	10 minggu

Perkiraan efek deterministik yang diterima jaringan sehat terutama kulit dapat dilihat pada Lampiran 11 dengan membandingkan nilai dosis serap yang sudah diketahui.

Tabel 20. Perkiraan efek deteriministik pada kulit

Konsentrasi Boron	Rentang dosis serap pada kulit (Gy)	Perkiraan efek yang diterima
20 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker	0.58	Tidak ada
25 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker	0	Tidak ada
30 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker	0	Tidak Ada
35 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker	2,93	Eritema awal

Dilihat dari Tabel 20, didapat nilai konsentrasi boron yang tidak memberikan efek deteriministik pada kulit yaitu pada konsentrasi 20 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker dan 25 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker dan 30 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker, sedangkan untuk konsentrasi 35 $\mu\text{g}/\text{gram}$ kanker memberikan efek deteriministik yaitu eritema awal. Eritema adalah gejala kulit kemerahan akibat pelebaran pembuluh darah kapiler yang diakibatkan oleh paparan radiasi yang tinggi (Ahdika, 2015).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Penelitian dosimetri pada jaringan kanker *Glioblastoma Multiform* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Konsentrasi boron yang optimal untuk terapi kanker otak dengan mempertimbangkan dosis yang diterima jaringan sehat di sekitar kanker dan kanker serta waktu iradiasi yang paling singkat adalah 30 μ gram/gram.
2. Waktu yang dibutuhkan untuk iradiasi sel kanker dalam menerima dosis yang paling singkat yaitu 165,94 menit pada konsentrasi boron 30 μ gram/gram.

B. Saran

Untuk memperoleh hasil yang lebih baik, beberapa saran diberikan untuk penelitian selanjutnya.

1. Pemodelan organ harus memiliki ukuran yang lebih spesifik dengan mengambil data langsung ke rumah sakit untuk pasien yang mengidap kanker otak dengan stadium tertentu. Pemodelan yang tepat dapat memperjelas kasus yang akan diteliti.
2. Melibatkan dokter dan radiologi sebagai pihak medis yang lebih mengerti tentang pemodelan geometri otak.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahdika S. (2015). *Dosis Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) pada Kanker Kulit (Melanoma Maligna) menggunakan MCNPX-Code dengan Sumber Neutron dari Beamport Tembus Reaktor Kartini*. Skripsi. FMIPA-UNY.
- Akulapalli, S. (2010). *History of Cancer, Ancient and Modern Treatment Methods*. Journal of Cancer Science & Therapy. Vol 1. Issue 2. Hlm 1-4.
- American Cancer Society. (2014). *Cancer Fact and Figure 2014*. Washington : American Cancer Society.
- Bapeten. (2015). Dosimetri, diakses dari <http://asns.bapeten.go.id/files/insdosimetri.pdf> pada tanggal 8 April 2015.
- Barkirdere Z, Seda Orenary dan Mehmet Korkmaz. (2010). *Effect of Boron in Human Health*. Turki : Departemen Kimia Universitas Timur Tengah.
- Berlianti D. (2014). *Analisis Dosis di Organ Kritis pada Terapi Glioblastoma dengan Boron Neutron Capture Therapy Menggunakan Metode Simulasi MCNP5*. Skripsi. FT-UGM.
- Denise, B.P. (2008). *MCNPXTM User's Manual Version 2.6.0*. Los Alamos, New Mexico : Los Alamos National Laboratory.
- Fauziah N, Andang Widi Hartono dan Yohannes Sardjono. (2013). *A Conceptual Design of Neutron Collimator in the Thermal Column of Kartini Research Reactor for In Vitro and In Vivo Test of Boron Neutron Capture Therapy*. Yogyakarta : Departement of Physic Engineering.
- Herman Cember dan Thomas E. Johnson. (2009). *Introduction to Health Physics, 4th Edition*. McGraw-Hill, New York.
- Huang J. (2009). *Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatments*. University of surrey.
- IAEA. (2014). *PACT: Together Against Cancer*. PACT Programme Office International Atomic Energy Agency. Venna International Centre.

- Irhas. (2014). *Dosimetri BNCT pada kanker Hati (Hepatocellular Carcinoma) Menggunakan MCNP-Code dengan Sumber Neutron dari Kolom Termal Reaktor Kartini*. Skripsi. FT-UGM.
- Ilma M. (2014). *Dasar-dasar Pemrograman MCNPX*. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada.
- Locher GL. (1936). *Biological effect and therapeutic possibilities of neutrons*. Am J Roentgenol Laboratory, New York.
- Mika Kortensniemi. (2002). *Solutions for Clinical Implementation of Boron Neutron Capture Therapy*. Disertasi. University of Helsinki, Helsinki.
- MIT. (2008). *The Basics of Boron Neutron Therapy*. Diakses dari <http://web.mit.edu/nrl/www/bnct/info/description.html> pada tanggal 18 Agustus 2014.
- Rorer DA, Wambersie, G, Whitmore, R, Zamenhof, V, Levin, P, Andreo, dan Dodd B. (2001). *Current Status of Neutron Capture Therapy. A technical document*, IAEA-TECDOC-1223, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Ryan D et.al. (2013). *Enhancing drug delivery for boron neutron capture therapy of brain tumors with focused ultrasound*. Journal international Neuro-oncology. 15(9):1225–1235, 2013. doi:10.1093/neuonc/not052. Hlm 1225-1235.
- Saurwein W. (1993). *Principle and history of neutron capture therapy*. Strahlenther Onkol 169(1):1-6
- Shwarz AL, Schwarz RA, Charter LL. (2008). *MCNP Visual Editor Computer Code Manual*. Dokumen teknis, Los Alamos National Laboratory, New Mexico.
- Sridianti. (2015). *Lapisan otak*. Diakses dari <http://www.google.com/lapisan.otak.image> pada tanggal 22 Juni 2015.

- , (2015). *Struktur Jaringan Otak*. Diakses dari <http://www.google.com.struktur.jaringan.otak> pada tanggal 22 Juni 2015.
- Suzuki M, et.al. (2014). *Boron Neutron Capture Therapy Outcomes for Advanced or Recurrent Head and Neck Cancer*. Journal of Radiation Research, 2014, 55, 146–153. doi: 10.1093/jrr/rrt098.
- Takada K, et.al. (2014). *Evaluation of the Radiation Dose for Whole Body in Boron Neutron Capture Therapy*. Journal international: Progress in Nuclear Science and Technology, Volume 4 pp. 820-823.
- Wahyuningsih D. (2014). *Optimasi Desain Kolimator untuk Uji In Vivo Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) pada Beamport Tembus Reaktor Kartini Menggunakan Simulasi Monte Carlo N Particle 5 (MCNP5)*. Skripsi. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada.
- Wittig A, Wolfgang A.G. (2012). *Neutron Capture Therapy: Principles and Applications*. Heidelberg New York Dordrecht London: Springer.
- World Health Organization. (2012). *Latest world cancer statistics Global cancer burden rises to 14.1 million new cases in 2012: Marked increase in breast cancers must be addressed*. Jenewa.
- World Statistic Organization.(2014). *Cancer Country Profiles 2014*.World Health Organization. Jakarta, Indonesia.

LAMPIRAN 1

Kode Input MCNPX

Contoh Kode Input MCNPX : Konsentrasi Boron 20 μ gram/gram

c cell

c (nomor cell) (nomor material) (densitas(surface.....) imp:p=1

1 1 -2.6989000 -1 2 -9 vol=91231.9 imp:n=1 imp:p=1

3 13 -8.91 -4 6 -5 #1 #4 #5 #6 #7 imp:n=1 imp:p=1

2 0 #1 #3 #4 #5 #6 #7 #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 #16 &

#17 #18 #19 #20 #21 #22 #24 #25 #26 #27 #28 #29 &

#30 #31 #32 #33 imp:n=0 imp:p=0

4 3 -0.001205 3 -7 -5 #7 vol=11527.6 imp:n=1 imp:p=1

5 3 -0.001205 -4 18 -8 #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 #16 &

#17 #18 #19 #20 #21 #22 #24 #25 #26 #27 #28 #29 &

#30 #31 #32 #33 vol=116645.597 imp:n=1 imp:p=1

6 12 -9.49 -1 -3 9 -7 vol=22786.1 imp:n=1 imp:p=1

7 2 -9.78 -4 -5 10 vol=4580.44 imp:n=1 imp:p=1

8 4 -1 -11 12 vol=467.55399 imp:n=1 imp:p=1 \$Scalp

9 5 -1 -12 13 vol=422.88892 imp:n=1 imp:p=1 \$Cranium

10 10 -1.92 -13 14 vol=356.1396 imp:n=1 imp:p=1 \$Soft Tissue

11 11 -1.06 -1 -14 15 -21 #17 #18 #19 #20 #21 #22 #24 &

#25 #26 #27 #28 #29 #30 #31 #32 #33 &

vol=60.59977 imp:n=1 imp:p=1 \$Cerebrum

12 9 -1.04 -15 16 vol=219.97584 imp:n=1 imp:p=1 \$PTV

13 8 -1.04 -16 17 vol=287.41885 imp:n=1 imp:p=1 \$CTV

14 7 -1.144 -17 vol=267.94667 imp:n=1 imp:p=1 \$GTV

c 15 7 -1.144 -17 20 vol=133.97 imp:n=1 imp:p=1

16 6 -1.28 7 -18 -4 5 imp:n=1 imp:p=1
 17 11 -1.06 -14 15 21 -22 vol=60.59977 imp:n=1 imp:p=1
 18 11 -1.06 -14 15 22 -23 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 19 11 -1.06 -14 15 23 -24 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 20 11 -1.06 -14 15 24 -25 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 21 11 -1.06 -14 15 25 -26 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 22 3 -0.001205 -7 -18 5 vol=40 imp:n=1 imp:p=1
 c 23 11 -1.06 -14 15 22 -26 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 24 11 -1.06 -14 15 26 -27 vol=7.5497125 imp:n=1 imp:p=1
 25 11 -1.06 -14 15 27 -28 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 26 11 -1.06 -14 15 28 -29 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 27 11 -1.06 -14 15 29 -30 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 28 11 -1.06 -14 15 30 -31 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 29 11 -1.06 -14 15 31 -32 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 30 11 -1.06 -14 15 32 -33 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 31 11 -1.06 -14 15 33 -34 vol=15.1499425 imp:n=1 imp:p=1
 32 11 -1.06 -14 15 34 -35 vol=60.59977 imp:n=1 imp:p=1
 33 11 -1.06 -14 15 35 vol=60.59977 imp:n=1 imp:p=1

c surface

1 cx 22

2 px 0

3 px 75

4 cx 27

5 px 97

6 px -0.1

7 kx 99 0.8 -1

8 px 150

9 px 60

10 px 95

c otak

c -----

c 11 s 109 0 0 12

11 sq 3170.073 4221.153 7876.989 0 0 0 -324661.1 119.5 0 0 \$Scalp

12 sq 2771.390736 3759.038721 6132.4561 0 0 0 -252757.7636 119.5 0 0
\$Cranium

13 sq 1592.01 2207.825156 4626.7204 0 0 0 -127523.981 119.5 0 0 \$Soft
Tissue

14 sq 1059.5025 1507.574756 3416.4025 0 0 0 -73871.16306 119.5 0 0
\$Cerebrum

15 sx 114.1 2.85 \$PTV

16 sx 114.1 2.55 \$CTV

17 sx 114.1 2 \$GTV

18 px 98

c 19 px 113

c cacah

c 20 px 105.9

21 px 117.95

22 px 119.95

23 px 120.45

24 px 120.95

25 px 121.45

26 px 121.95

27 px 122.2
 28 px 122.45
 29 px 122.7
 30 px 122.95
 31 px 123.2
 32 px 123.45
 33 px 123.7
 34 px 123.95
 35 px 125.95
 36 sq 3170.173 4221.153 7877.089 0 0 0 -334661.1 119.5 0 0
 36 sq 3170.173 4221.153 7877.089 0 0 0 -334661.1 119.5 0 0

 c data
 c sumber
 sdef sur=2 ERG=0.1 AXS=1 0 0 par=n vec=1 0 0 dir=1
 m1 13027 -1.000 \$ Aluminium
 m2 83209 -1.000 \$ Bismuth
 m3 6000 -0.000124 7014 -0.755268 8016 -0.231781 18000 -0.012827 \$
 udara
 m4 1001 -0.100386824 6012 -0.2277935 7014 -0.04632716 8016 -
 0.617763996 &
 11023 -0.00006986 12000 -0.00005988 15031 -0.00032934 16032 -
 0.00158682 &
 17000 -0.00266466 19000 -0.0008483 20000 -0.0001497 26000 -
 0.00000998 &
 30000 -0.00000998 5010 -0.002 \$kulit kepala
 m5 1001 -0.033932 6012 -0.15649 7014 -0.041916 8016 -0.43413 &

11023 -0.000998 12000 -0.001996 15031 -0.102794 &
 16032 -0.002994 20000 -0.22455 5010 -0.002 \$ cranium
 m6 3006 -0.083 6000 -0.512 8016 -0.33 1001 -0.072 \$Li2CO3-poly
 m7 1001 -0.09701903 6012 -0.263617364 7014 -0.04409951 &
 8016 -0.557614424 15031 -0.017639804 5010 -0.02 \$GTV
 m8 1001 -0.106785997 6012 -0.144709995 7014 -0.02195599 &
 8016 -0.71057597 11023 -0.001996 15031 -0.003992 16032 -0.001996 &
 17000 -0.002994 19000 -0.002994 5010 -0.002 \$CTV
 m9 1001 -0.106785997 6012 -0.144709995 7014 -0.02195599 8016 -
 0.71057597 &
 11023 -0.001996 15031 -0.003992 16032 -0.001996 &
 17000 -0.002994 19000 -0.002994 5010 -0.002 \$PTV
 m10 1001 -0.106785997 6012 -0.14470995 7014 -0.02195599 8016 -
 0.71057597 &
 15031 -0.003992 5010 -0.002 \$cerebrum
 m11 1001 -0.104263056 6012 -0.23172562 7014 -0.02483024 8016 -
 0.628977524 &
 11023 -0.00112774 12000 -0.00012974 15031 -0.00132734 16032 -
 0.00198602 &
 17000 -0.00133732 19000 -0.00198602 20000 -0.00022954 26000 -
 0.0000499 &
 30000 -0.00002994 5010 -0.002 \$Soft Tissue
 m12 28060.62c -0.995 28058.62c -0.005 \$nickel-60
 m13 28000 -1.000 \$nikel murni
 mode n p
 f4:n 5 8 9 10 11 12 13 14 17 18 19 20 21 22 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33
 fm4 6.32036e14
 e4 5e-7 0.01 20

f34:n 5 8 9 10 11 12 13 14 17 18 19 20 21 22 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33

fm34 6.32036e14

e34 5e-7 0.01 20

de34 3.6E-7 6.3E-7 1.1E-6 2E-6 3.6E-6

6.3E-6 1.1E-5 2E-5 3.6E-5 6.3E-5

1.1E-4 2E-4 3.6E-4 6.3e-4 1.1e-3

2e-3 3.6e-3 6.3e-3 0.011 0.02

0.036 0.063 0.082 0.086 0.09

0.094 0.098 0.105 0.115 0.125

0.135 0.145 0.155 0.165 0.175

0.185 0.195 0.21 0.23 0.25

0.27 0.29 0.31 0.33 0.35

0.37 0.39 0.42 0.46 0.5

0.54 0.58 0.62 0.66 0.7

0.74 0.78 0.82 0.86 0.9

0.94 0.98 1.05 1.15 1.25

1.35 1.45 1.55 1.65 1.75

1.85 1.95 2.1 2.3 2.5

2.7 2.9 3.1 3.3 3.5

3.7 3.9 4.2 4.6 5

5.4 5.8 6.2 6.6 7

7.4 7.8 8.2 8.6 9

9.4 9.8 10.5 11.5 12.5

df34 5.06E-14 3.84e-14 2.91e-14 2.17e-14 1.64e-14

1.28e-14 1.03e-14 8.92e-15 8.87e-15 1.05e-14

1.45e-14 2.33e-14 3.97e-14 6.78E-14 1.17e-13

2.1e-13	3.73e-13	6.42e-13	1.09e-12	1.09e-12
1.88e-12	3.11e-12	4.82e-12	5.86e-12	6.05e-12
6.24e-12	6.44e-12	6.62e-12	6.92e-12	7.35e-12
7.76e-12	8.13e-12	8.50e-12	8.86e-12	9.19e-12
9.51e-12	9.83e-12	1.01e-11	1.06e-11	1.11e-11
1.16e-11	1.21e-11	1.27e-11	1.31e-11	1.36e-11
1.41e-11	1.46e-11	1.52e-11	1.66e-11	1.64e-11
1.65e-11	1.71e-11	1.77e-11	1.83e-11	1.89e-11
1.95e-11	2e-11	2.06e-11	2.11e-11	2.16e-11
2.23e-11	2.33e-11	2.5e-11	2.52e-11	2.52e-11
2.63e-11	2.71e-11	2.76e-11	2.83e-11	2.94e-11
2.99e-11	3.12e-11	3.13e-11	3.24e-11	3.29e-11
3.44e-11	3.59e-11	3.75e-11	3.85e-11	4.19e-11
4.29e-11	4.4e-11	4.33e-11	4.43e-11	4.43e-11
4.68e-11	4.57e-11	4.77e-11	4.92e-11	5.07e-11
5.19e-11	5.42e-11	5.47e-11	5.41e-11	5.56e-11
5.66e-11	5.83e-11	5.96e-11	6.01e-11	6.38e-11
f24:p 5 \$dosis gamma				
fm24 6.32036e14				
de24 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006				
0.008 0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 0.05				
0.06 0.08 0.1 0.15 0.2 0.3 0.4				
0.5 0.6 0.8 1 1.25 1.5 2				
3 4 5 6 8 10 15				
20				
df24 5.63e-10 2.83e-10 1.68e-10 8.07e-11 4.7e-11				

3.02e-11 2.09e-11 1.16e-11 7.24e-12 3.04e-12
1.64e-12 7.02e-13 4.23e-13 3.25e-13 2.98e-13
3.27e-13 4.03e-13 6.61e-13 9.43e-13 1.52e-12
2.09e-12 2.62e-12 3.13e-12 4.08e-12 4.93e-12
5.89e-12 6.76e-12 8.29e-12 1.09e-11 1.31e-11
1.52e-11 1.71e-11 2.09e-11 2.47e-11 3.39e-11
4.33e-11

nps 1000000

LAMPIRAN 2

Perhitungan Massa Boron dalam Jaringan dan Penjabaran Persamaan untuk Geometri Otak

Contoh untuk perhitungan konsentrasi Boron-10 sebanyak 20 $\mu\text{gram/g}$ kanker.

A. Tumor (*Gross Tumor Volume*)

$$\begin{aligned}V &= 267,947 \text{ cm}^3 \\r &= 1,04 \text{ g/cm}^3 \\m_{\text{kanker}} &= V \times r \\&= 267,947 \times 1,04 \\&= 68,067840831 \text{ g} \\m_{\text{Boron-10}} &= 20 \text{ mg} \times 10^{-6} \text{ g/mg} \times 68,067840831 \text{ g} \\&= 1,361357 \times 10^{-3} \text{ g}\end{aligned}$$

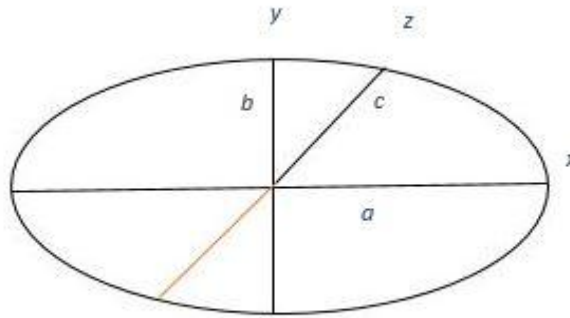
B. *Clinical Tumor Volume* (CTV)

$$\begin{aligned}V &= 114,1445331 \text{ cm}^3 \\r &= 1,04 \text{ g/cm}^3 \\m_{\text{CTV}} &= V \times r \\&= 114,1445331 \times 1,04 \\&= 118,7103144 \text{ g} \\m_{\text{Boron-10}} &= 0,5 \times 20 \text{ mg} \times 10^{-6} \text{ mg/g} \times 68,067840831 \text{ g} \\&= 6,80678 \times 10^{-4} \text{ g}\end{aligned}$$

C. *Planning Tumor Volume* (PTV)

$$\begin{aligned}V &= 202,1091274 \text{ cm}^3 \\r &= 0,21 \text{ g/cm}^3 \\m_{\text{PTV}} &= V \times r \\&= 202,1091274 \times 0,21 \\&= 42,44291675 \text{ g} \\m_{\text{Boron-10}} &= 0,1 \times 20 \text{ mg} \times 10^{-6} \text{ g/mg} \times 68,067840831 \text{ g} \\&= 1,361357 \times 10^{-4} \text{ g}\end{aligned}$$

Penjabaran Persamaan untuk Geometri Otak



Persamaan yang digunakan untuk geometri otak (berbentuk ellipsoid) dengan lapisan pertama yaitu kulit kepala adalah :

$$\frac{(x-x_p)^2}{a^2} + \frac{(y-y_p)^2}{b^2} + \frac{(z-z_p)^2}{c^2} = 1$$

$$\frac{(x-x_1)^2 \cdot b^2 c^2 + (y-y_1)^2 \cdot a^2 c^2 + (z-z_1)^2 \cdot a^2 b^2}{a^2 \cdot b^2 \cdot c^2} = 0$$

$$(x-x_1)^2 \cdot b^2 c^2 + (y-y_1)^2 \cdot a^2 c^2 + (z-z_1)^2 \cdot a^2 b^2 = a^2 \cdot b^2 \cdot c^2$$

$$(x-x_1)^2 \cdot b^2 c^2 + (y-y_1)^2 \cdot a^2 c^2 + (z-z_1)^2 \cdot a^2 b^2 - a^2 \cdot b^2 \cdot c^2 = 0$$

$$b^2 c^2 = A, a^2 c^2 = B, a^2 b^2 = C, a^2 \cdot b^2 \cdot c^2 = G$$

$$D=0, E=0, F=0$$

$$10,12^2 \text{ cm} = a, \quad 8,77^2 \text{ cm} = b, \quad 6,42^2 \text{ cm} = c$$

$$a = 102,414 \text{ cm}^2$$

$$b = 76,9129 \text{ cm}^2$$

$$c = 41,2164 \text{ cm}^2$$

$$A = (b \times c) = 3170,073$$

$$B = (a \times c) = 4221,153$$

$$C = (a \times b) = 7876,989$$

$$G = (a \times b \times c) = 324661,1$$

Persamaan yang digunakan untuk jaringan kanker (berbentuk bola) adalah :

$$(x)^2 + (y - 119,5)^2 + (z - 21,3)^2 - 2^2 = 0$$

Keterangan : Angka 119,5 merupakan koordinat x untuk jaringan kanker otak

Angka 21,3 merupakan diameter panjang x untuk pemodelan kepala

Angka 2 merupakan jari-jari jaringan kanker

LAMPIRAN 3

Perhitungan Dosis Boron, Dosis Proton, Dosis Hamburan Neutron dan Dosis Gamma

Contoh perhitungan dosis tiap komponen radiasi dan laju dosis total pada kanker dengan konsentrasi Boron 20 µgram/gram

1. Dosis hamburan neutron.

$$\dot{D} = 2,1606 \times 10^{-5} \frac{Gy}{detik}$$

2. Dosis sinar gamma .

a. Dosis dari dalam kolimator.

$$\dot{D} = 2,92 \times 10^{-4} \frac{Gy}{detik}$$

b. Dosis dari reaksi neutron dengan materi jaringan kanker.

$$\Phi = 4,1396 \times 10^7 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$m_{\text{jaringan kanker}} = 0,0306531 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Hidrogen}} &= \text{fraksi Hidrogen} \times m_{\text{jaringan kanker}} \\ &= 0,100588 \times 30,6351 \text{ g} \\ &= 3,08334 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{\text{Hidrogen-kanker}} &= \frac{\left(\frac{m}{Ar}\right)_{\text{Hidrogen}} \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{m_{\text{kanker}}} \\ &= \frac{\left(\frac{3,795245}{2}\right) \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{0,0306531} \\ &= 3,72862 \times 10^{22} \text{ atom/kg} \end{aligned}$$

Laju pelepasan sinar gamma yang dihasilkan di dalam kanker adalah

$$\sigma_{H-1} = 3,31960 \times 10^{-25}$$

$$\begin{aligned} \ddot{R} &= \Phi \cdot N_{\text{Hidrogen-kanker}} \cdot \sigma_{H-1} \\ &= 4,13967 \times 10^7 \times 3,72862 \times 10^{22} \times 3,31960 \times 10^{-25} \\ &= 5,12389 \times 10^5 \text{ Bq/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta &= 2,33 \frac{MeV}{\gamma} \times 1,6 \times 10^{-13} \\ &= 3,568 \times 10^{-13} \frac{Gy/detik}{Bq/kg} \end{aligned}$$

ϕ = 0,0145 (hasil interpolasi pada tabel fraksi serapan dengan sumber berada di cerebral cortex dan target adalah cerebral cortex).

$$\begin{aligned}\dot{D} &= \ddot{R} \Delta \phi \\ &= 5,12389 \times 10^5 \times 3,568 \times 10^{-13} \times 0,0145 \\ &= 1,6171 \times 10^{-8}\end{aligned}$$

Dosis untuk jaringan lain dihitung dengan cara yang sama hanya dengan merubah parameter-parameter yang berbeda.

3. Dosis alfa hasil interaksi Boron dengan neutron termal.

$$\begin{aligned}\Phi &= 4,13967 \times 10^7 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1} \\ m_{\text{Boron-10}} &= 6,13 \times 10^{-3} \text{ g} \\ m_{\text{jaringan kanker}} &= 0,0306531 \text{ kg} \\ A_r \text{ B} &= 10 \text{ g/mol} \\ \sigma \text{ B} &= 3,8637 \times 10^{-21} \text{ cm}^2 \\ E &= 2,33 \text{ meV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 3,728 \times 10^{-13} \text{ J} \\ N_{\text{Boron-kanker}} &= \frac{\left(\frac{6,13 \times 10^{-3}}{10}\right) \times 6.023 \times \frac{10^{23} \text{ atom}}{\text{mol}}}{0,0306531 \text{ kg}} \\ &= 1,205 \times 10^{19} \text{ atom/kg} \\ \dot{D} &= N\Phi\sigma E \\ &= 1,205 \times 10^{19} \times 4,13967 \times 10^7 \times 3,8637 \times 10^{-21} \times \\ &\quad 3,728 \times 10^{-13} \\ &= 7,183 \times 10^{-7} \text{ Gy/detik}\end{aligned}$$

4. Dosis nitrogen

$$\begin{aligned}\Phi &= 4,13967 \times 10^7 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1} \\ m_{\text{Nitrogen}} &= 3,062991577 \text{ g} \\ m_{\text{jaringan kanker}} &= 0,0306531 \text{ kg} \\ A_r \text{ N} &= 14 \text{ g/mol} \\ \sigma \text{ N} &= 1,8269 \times 10^{-24} \text{ cm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{Nitrogen-kanker} &= \frac{\left(\frac{3,062991577}{10}\right) \times 6,023 \times \frac{10^{23} \text{ atom}}{\text{mol}}}{0,0306531 \text{ kg}} \\
&= 1,204 \times 10^{21} \\
\dot{D} &= \frac{N_{Nitrogen-kanker} \Phi \sigma_{Nitrogen} \times Q \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}} \\
&= \frac{1,204 \times 10^{21} \times 4,13967 \times 10^7 \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}} \\
&= 8,808 \times 10^{-8} \text{ Gy/detik}
\end{aligned}$$

5. Dosis total

$$\begin{aligned}
\dot{D}_{total} &= (w_{Alfa} \times \dot{D}_{Alfa}) + (w_p \times \dot{D}_{proton}) + (w_n \times \dot{D}_{neutron}) + (w_\gamma \times \dot{D}_\gamma) \\
\dot{D}_{total} &= (3,8 \times \dot{D}_{Alfa}) + (3,2 \times \dot{D}_{proton}) + (3,2 \times \dot{D}_{neutron}) + (1 \times \dot{D}_\gamma)
\end{aligned}$$

Perhitungan dosis untuk jaringan target lain menggunakan perhitungan yang sama hanya nilai parameter yang dihitung saja berbeda.

LAMPIRAN 4

Tabel Fraksi Dosis Gamma

TABLE A4
Absorbed Fractions for Sources Located in the Central Cornea

[illegible]

Target	Energy in [MeV]					
	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Bladder wall	5.60E-07	1.21E-06	5.80E-07	8.48E-07	9.02E-07	9.93E-07
Stomach wall	6.96E-06	6.50E-06	6.44E-06	6.00E-06	6.11E-06	5.17E-06
Small intestine plus contents	6.01E-06	5.44E-06	5.16E-06	5.10E-06	4.64E-06	4.16E-06
Upper large intestine wall	8.71E-06	8.84E-06	7.71E-06	6.52E-06	6.96E-06	5.21E-06
Lower large intestine wall	8.55E-07	1.12E-06	8.88E-07	1.24E-06	9.53E-07	1.40E-06
Kidneys	1.36E-05	1.29E-05	1.18E-05	1.14E-05	1.10E-05	8.23E-06
Liver	8.82E-05	8.89E-05	8.07E-05	7.48E-05	6.86E-05	5.58E-05
Lungs	8.84E-06	8.23E-06	7.90E-06	7.72E-06	6.96E-06	5.60E-06
"Other tissues" (suggested for muscle)	3.82E-06 [Ⓢ]	3.85E-06 [Ⓢ]	3.69E-06 [Ⓢ]	3.46E-06 [Ⓢ]	3.30E-06 [Ⓢ]	2.80E-06 [Ⓢ]
Ovaries	1.80E-06	6.53E-07	2.49E-06 [†]	3.44E-06	2.22E-06 [†]	1.92E-06 [†]
Pancreas	1.35E-05	1.66E-05	1.36E-05	1.21E-05	9.99E-06	8.7E-06
Skeleton (suggested for total endosteal cells)	3.17E-06	2.53E-06	2.30E-06	2.26E-06	2.20E-06	1.8E-06
Red marrow	4.64E-06	3.72E-06	3.21E-06	3.26E-06	3.17E-06	2.62E-06
Skin	1.89E-06	2.08E-06	2.08E-06	2.02E-06	2.10E-06	1.7E-06
Spleen	3.34E-06	3.44E-06	3.81E-06	2.95E-06	3.14E-06	2.14E-06
Testes	3.05E-07 [†]	3.92E-07 [†]	8.76E-07	4.70E-07 [†]	4.79E-07 [†]	4.62E-07 [†]
Thymus	2.27E-06	4.64E-06	2.54E-06	2.17E-06	2.65E-06	3.92E-06
Thyroid	8.23E-07	6.32E-07 [†]	6.81E-07 [†]	6.87E-07 [†]	6.90E-07 [†]	6.40E-07 [†]
Uterus	1.40E-06	1.52E-06	1.28E-06	2.07E-06	1.81E-06	1.38E-06
Total body	5.94E-06	5.86E-06	5.49E-06	5.16E-06	4.86E-06	4.06E-06

* Extrapolation from higher energy.

† Build-up factor method.

Ⓢ Calculated by difference.

Source: From ICRP Report No. 23, *Auxiliary of the Task Group on Reference Man*, Pergamon Press, Oxford, England, 1975. By permission.

LAMPIRAN 5

**Tabel Perbandingan Dosis Gamma antara Konsentrasi Boron 20, 25, 30 dan 35
μgram/gram Kanker**

Jaringan	Nomor <i>Cell</i>	Dosis Gamma Reaksi (Gy/detik)			
		20μgram/gram kanker	25μgram/gram kanker	30μgram/gram kanker	35μgram/gram kanker
sebelum kulit	134	2.80E-04	2.81E-04	2.17E-07	9.09E-06
kulit kepala	8	3.67E-08	1.03E+05	9.99E+04	9.09E-06
<i>cranium</i>	9	2.81E-10	2.79E-10	2.78E-10	5.59E-08
<i>soft tissue</i>	10	4.94E-09	4.96E-09	5.01E-09	9.19E-07
<i>cerebrum</i>	11	7.53E-07	6.74E-07	7.18E-07	1.36E-04
PTV	12	1.58E-08	1.16E-08	1.39E-08	1.90E-06
CTV	13	6.69E-09	4.14E-09	5.30E-09	1.35E-06
GTV	14	7.04E-10	4.83E-10	7.61E-10	2.65E-07
slice	17	1.09E-08	1.08E-08	1.08E-08	1.62E-06
slice	18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.34E-06
slice	21	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.89E-03
slice	24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.90E-06
slice	25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.46E-06
slice	26	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.57E-06
slice	27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.97E-06
slice	28	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.34E-06
slice	29	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	31	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	33	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

LAMPIRAN 6

**Tabel Perbandingan Dosis Nitrogen antara Konsentrasi Boron 20, 25, 30 dan
35 µgram/gram Kanker**

Jaringan	Nomor <i>Cell</i>	Dosis Nitrogen (Gy/detik)			
		20µgram/gram kanker	25µgram/gram kanker	30µgram/gram kanker	35µgram/gram kanker
sebelum kulit	134	4.52E-04	4.54E-04	3.51E-07	1.47E-05
kulit kepala	8	6.56E-08	5.97E-08	5.77E-08	1.47E-05
<i>cranium</i>	9	6.74E-08	1.08E-07	1.08E-07	2.17E-05
<i>soft tissue</i>	10	3.66E-07	3.45E-08	3.49E-08	6.40E-06
<i>cerebrum</i>	11	4.05E-07	1.29E-06	1.38E-06	2.59E-04
PTV	12	2.31E-08	2.22E-08	2.66E-08	3.64E-06
CTV	13	1.25E-08	7.93E-09	1.02E-08	2.58E-06
GTV	14	2.34E-08	3.36E-09	5.30E-09	1.85E-06
slice	17	3.03E-07	7.54E-08	7.50E-08	1.13E-05
slice	18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.30E-06
slice	21	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.32E-02
slice	24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.11E-05
slice	25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.02E-05
slice	26	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.79E-05
slice	27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.85E-05
slice	28	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.72E-05
slice	29	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	31	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	33	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

LAMPIRAN 7

**Tabel Perbandingan Dosis Boron antara Konsentrasi Boron 20, 25, 30 dan 35
μgram/gram Kanker**

Jaringan	Nomor <i>Cell</i>	Dosis Boron (Gy/detik)			
		20μgram/gram kanker	25μgram/gram kanker	30μgram/gram kanker	35μgram/gram kanker
sebelum kulit	134	1.76E-03	1.77E-03	1.36E-06	8.73E-07
kulit kepala	8	2.31E-07	2.32E-07	2.24E-07	8.73E-07
<i>cranium</i>	9	4.24E-08	4.21E-08	4.19E-08	1.16E-06
<i>soft tissue</i>	10	1.34E-09	1.34E-09	1.36E-09	5.56E-07
<i>cerebrum</i>	11	5.61E-09	5.02E-09	5.35E-09	2.12E-06
PTV	12	1.17E-11	8.62E-12	1.03E-11	1.06E-07
CTV	13	4.99E-13	3.09E-13	3.95E-13	9.78E-08
GTV	14	1.91E-07	1.31E-07	2.06E-07	7.18E-08
slice	17	2.95E-13	2.93E-13	2.92E-13	9.18E-08
slice	18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.90E-08
slice	21	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.06E-08
slice	24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.17E-08
slice	25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.08E-08
slice	26	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.65E-08
slice	27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.89E-08
slice	28	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.58E-08
slice	29	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	31	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	33	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

LAMPIRAN 8

Tabel Perbandingan Dosis Hamburan Neutron antara Konsentrasi Boron 20, 25, 30 dan 35 µgram/gram Kanker

Jaringan	Nomor <i>Cell</i>	Dosis Hamburan Neutron (Gy/detik)			
		20µgram/gram kanker	25µgram/gram kanker	30µgram/gram kanker	35µgram/gram kanker
sebelum kulit	134	2.20E-04	2.20E-04	2.19E-04	2.17E-04
kulit kepala	8	2.21E-05	2.20E-05	2.16E-05	1.03E-05
<i>cranium</i>	9	2.73E-05	2.69E-05	2.67E-05	5.77E-06
<i>soft tissue</i>	10	1.17E-05	1.14E-05	1.13E-05	1.34E-06
<i>cerebrum</i>	11	3.90E-05	3.58E-05	3.53E-05	7.48E-06
PTV	12	7.18E-06	6.35E-06	6.98E-06	2.72E-07
CTV	13	2.27E-06	7.26E-07	2.00E-06	1.44E-07
GTV	14	4.61E-07	2.07E-07	3.33E-07	3.56E-08
slice	17	1.05E-05	5.52E-06	5.15E-06	2.93E-06
slice	18	2.66E-06	1.56E-06	2.80E-06	0.00E+00
slice	19	1.99E-06	1.12E-06	4.40E-07	0.00E+00
slice	20	7.74E-07	7.59E-07	0.00E+00	0.00E+00
slice	21	3.43E-07	3.31E-07	0.00E+00	0.00E+00
slice	24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	26	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	28	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	29	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	31	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
slice	33	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

LAMPIRAN 9

**Tabel Perbandingan Dosis Total antara Konsentrasi Boron 20, 25, 30 dan 35
μgram/gram Kanker**

Jaringan	Nomor <i>Cell</i>	Dosis Total (Gy/detik)			
		20μgram/gram kanker	25μgram/gram kanker	30μgram/gram kanker	35μgram/gram kanker
sebelum kulit	134	9.42E-03	9.46E-03	1.01E-03	1.05E-03
kulit kepala	8	3.69E-04	1.03E+05	9.99E+04	3.84E-04
<i>cranium</i>	9	3.85E-04	3.85E-04	3.85E-04	3.84E-04
<i>soft tissue</i>	10	3.36E-04	3.36E-04	3.36E-04	3.19E-04
<i>cerebrum</i>	11	4.24E-04	4.18E-04	4.18E-04	1.29E-03
PTV	12	3.20E-04	3.19E-04	3.22E-04	3.06E-04
CTV	13	3.04E-04	3.01E-04	3.06E-04	3.02E-04
GTV	14	2.99E-04	3.00E-04	3.01E-04	2.98E-04
slice	17	3.32E-04	3.17E-04	3.16E-04	3.39E-04
slice	18	3.05E-04	3.04E-04	3.08E-04	2.91E-04
slice	19	3.03E-04	3.02E-04	3.01E-04	2.91E-04
slice	20	2.99E-04	3.01E-04	2.99E-04	3.22E-04
slice	21	2.98E-04	3.00E-04	2.99E-04	4.43E-02
slice	24	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	4.29E-04
slice	25	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	3.25E-04
slice	26	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	3.51E-04
slice	27	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	4.54E-04
slice	28	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	4.16E-04
slice	29	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	2.91E-04
slice	30	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	2.91E-04
slice	31	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	2.91E-04
slice	32	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	2.91E-04
slice	33	2.97E-04	2.99E-04	2.99E-04	2.91E-04

LAMPIRAN 10

**Tabel Perbandingan Waktu Irradiasi antara Konsentrasi Boron 20, 25, 30 dan
35 µgram/gram Kanker**

Jaringan	Nomor <i>Cell</i>	Waktu Iradiasi (jam)			
		20µgram/gram kanker	25µgram/gram kanker	30µgram/gram kanker	35µgram/gram kanker
sebelum kulit	134	0.09	0.09	0.83	0.80
kulit kepala	8	2.26	0.00	0.00	2.17
<i>cranium</i>	9	2.17	2.16	2.16	2.17
<i>soft tissue</i>	10	2.48	2.48	2.48	2.61
<i>cerebrum</i>	11	1.97	1.99	2.00	0.65
PTV	12	2.60	2.61	2.59	2.72
CTV	13	2.74	2.77	2.72	2.76
GTV	14	2.79	2.78	2.77	2.80
slice	17	2.51	2.63	2.64	2.46
slice	18	2.73	2.74	2.70	2.86
slice	19	2.75	2.76	2.77	2.86
slice	20	2.78	2.77	2.78	2.58
slice	21	2.80	2.78	2.78	0.02
slice	24	2.81	2.79	2.78	1.94
slice	25	2.81	2.79	2.78	2.56
slice	26	2.81	2.79	2.78	2.37
slice	27	2.81	2.79	2.78	1.84
slice	28	2.81	2.79	2.78	2.00
slice	29	2.81	2.79	2.78	2.86
slice	30	2.81	2.79	2.78	2.86
slice	31	2.81	2.79	2.78	2.86
slice	32	2.81	2.79	2.78	2.86
slice	33	2.81	2.79	2.78	2.86

LAMPIRAN 11

**Tabel Perbandingan Dosis Serap Total antara Konsentrasi Boron 20, 25, 30 dan
35 µgram/gram Kanker**

Jaringan	Nomor <i>Cell</i>	Dosis Serap Total (Gy)			
		20µgram/gram kanker	25µgram/gram kanker	30µgram/gram kanker	35µgram/gram kanker
sebelum kulit	134	2.91	2.91	3.00	2.97
kulit kepala	8	0.58	0.00	0.00	2.93
<i>cranium</i>	9	0.69	3.00	3.00	3.00
<i>soft tissue</i>	10	0.35	3.00	3.00	2.99
<i>cerebrum</i>	11	0.90	3.00	2.99	2.68
PTV	12	0.22	3.00	3.00	2.98
CTV	13	0.07	3.00	3.00	2.99
GTV	14	30.00	30.00	30.00	30.00
slice	17	0.31	3.00	3.00	2.99
slice	18	0.08	3.00	3.00	3.00
slice	19	0.06	3.00	3.00	3.00
slice	20	0.02	3.00	3.00	2.99
slice	21	0.01	3.00	3.00	2.87
slice	24	0.00	3.00	3.00	2.96
slice	25	0.00	3.00	3.00	2.99
slice	26	0.00	3.00	3.00	2.98
slice	27	0.00	3.00	3.00	2.95
slice	28	0.00	3.00	3.00	2.96
slice	29	0.00	3.00	3.00	3.00
slice	30	0.00	3.00	3.00	3.00
slice	31	0.00	3.00	3.00	3.00
slice	32	0.00	3.00	3.00	3.00
slice	33	0.00	3.00	3.00	3.00